

# 이온 주입된 프로파일의 3-D의 해석적인 모델에 관한 연구

정원채<sup>1,a</sup>, 김형민<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 경기대학교 전자공학과

<sup>2</sup> 경기대학교 기계시스템공학과

## A Study on 3-D Analytical Model of Ion Implanted Profile

Won-Chae Jung<sup>1,a</sup> and Hyung-Min Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Electronic Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

<sup>2</sup> Department of Mechanical System Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

(Received November 23, 2011; Revised December 6, 2011; Accepted December 14, 2011)

**Abstract:** For integrated complementary metal oxide semiconductor (CMOS) circuits, the lateral spread for two dimensional (2-D) impurity distributions are very important for the analyzing the devices. The measured two dimensional SEM data obtained using the chemical etching method matched very well with the results of the Gauss model for boron implanted samples. But the profiles in boron implanted silicon were deviated from the Gauss model. The profiles in boron implanted silicon were shown a little bit steep profile in the deep region due to backscattering effect on the near surface from the bombardments of light boron ions. From the simulated 3-D data obtained using an analytical model, the 1-D and 2-D data were compared with the experimental data and could be verified the justification from the experimental data. The data of 3-D model were also shown good agreements with the experimental and the simulated data. It can be used in the 3-D chip design and the analysis of microelectro-mecanical system (MEMS) and special devices.

**Keywords:** B, Implantation, Chemical etching, Simulation, SIMS, SEM, Analytical model

### 1. 서 론

CMOS (complementary metal oxide semiconductor) 소자제작을 위해서, 소스와 드레인 영역들은 P<sup>+</sup> 도핑을 위해서 붕소의 이온주입기술이 사용된다. 붕소이온이 주입된 실리콘웨이퍼는 전기적인 활성화를 위해서 N<sub>2</sub> 가스 분위기에서 열처리가 수행된다. 현재에 붕소이온들의 확산과 활성화 메커니즘은 광범위하게 연구되어 왔다 [1-3]. 그럼에도 불구하고 붕소의 cluster들의 형성과 이에 따른 확산 현상들은 아직도 완전하게 이해되지 못하고 있다. 본 실험에서는 선택적

에칭을 사용하여 얻어진 이차원의 SEM (scanning electron microscope) mapping 데이터와 SIMS를 이용한 일차원적인 데이터를 ICECREM (integrated circuits and electronics group computerised remedial education and mastering) [4-6]과 SRIM (the stopping and range of ions in matter) [7-10]과 서로 비교하였고 일차원, 이차원의 붕소의 분포를 통하여 삼차원적인 해석적 모델을 개발하여 본 논문에서 처음으로 제시하였다. SRIM의 range 데이터와 SIMS의 데이터로부터 계산된 일차원적인 데이터는 이차원 및 삼차원적인 확산 분포를 나타내기 위해서 본 논문에서 제안된 모델이 적용되어 졌다. 해석적인 모델을 개발하기 위해서 메

쉬와 그리드의 구조는 Gambit [11-15]을 이용하였고 모든 열처리와 확산은 확산계수를 적용하여 Fluent [16-20] 프로그램을 사용하였다. 개발된 해석적인 모델의 결과들은 급온 열처리 RTA (rapid thermal annealing) 후에 측정된 SEM (scanning electron microscope) 및 SIMS (secondary ion mass spectroscopy) 데이터와 서로 비교하여 제시한 본 모델의 정당성을 확립할 수 있었다. 이온 주입된 분포의 파라미터는 다음의 수식들을 통하여 구해질 수가 있다.  $C_{dose}$ 는 주입된 이온의 도즈이고  $C(x)$ 는 깊이  $x$ 에 대한 농도를 나타내며,  $f(x)$ 는 규격화된 분포함수를 나타낸다. 네 개의 모멘트는 다음과 같은 수식으로 나타내어진다.

$$C(x) = C_{dose} \cdot f(x) \tag{1}$$

$$R_p = \int_0^\infty x \cdot f(x) \tag{2}$$

$$\Delta R_p = \sqrt{\int_0^\infty (x - R_p)^2 \cdot f(x) dx} \tag{3}$$

$$\gamma = \frac{\int_0^\infty (x - R_p)^3 \cdot f(x) dx}{\Delta R_p^3} \tag{4}$$

$$\beta = \frac{\int_0^\infty (x - R_p)^4 \cdot f(x) dx}{\Delta R_p^4} \tag{5}$$

여기서 첫 번째 모멘트인 projected average range ( $R_p$ )는 수직방향으로 주입된 평균거리이고 standard deviation ( $\Delta R_p$ )는 두 번째 모멘트로써, 수직방향으로 입사 시 표준편차를 나타낸다.

세 번째 모멘트인 skewness ( $\gamma$ )는 프로파일의 비대칭성을 나타내며, 네 번째 모멘트인 kurtosis ( $\beta$ )는 프로파일의 최대값의 농도를 나타내는 영역의 샤프(sharpness)한 정도를 나타낸다. 대칭성에 따른 가우스 (Gauss)분포는 다음의 수식으로 표현된다.

$$C(x) = \frac{C_{dose}}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} \exp\left(-\frac{1}{2} \left[\frac{x - R_p}{\Delta R_p}\right]^2\right) \tag{6}$$

프로파일의 가우스분포의  $R_p$ 는 피크농도 영역 가까이 위치하고 있다. 확산된 가우스분포는 기존의  $\Delta R_p$  대신에  $\Delta R_p = \sqrt{(\Delta R_p^2 + 2Dt)}$  을 수식 (6)에 적용하면 된다. 마스크에 입사각  $0^\circ$ 인 수직방향으

로 입사된 경우에 이온 주입된 삼차원적인 분포는 수식 (7)에서 나타난 가우스모델을 적용해서 해석적인 방법으로 나타낼 수가 있다.

$$C(x, y, z) = \frac{C_{dose}}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} \exp\left(-\frac{(y - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right) \times \left[\frac{1}{2} \left(\operatorname{erfc}\frac{x-a}{\sqrt{2}\Delta R_L} - \operatorname{erfc}\frac{x+a}{\sqrt{2}\Delta R_L}\right)\right] \times \exp\left(\frac{-z^2}{2\Delta R_z^2}\right) \tag{7}$$

여기서  $\Delta R_p, \Delta R_L, \Delta R_z$ 는  $x, y, z$ 방향으로의 각각의 표준편차를 나타낸다. 좌표의 축 방향에서  $x$ 는 수직방향,  $y$ 는 측면방향,  $z$ 는 측면방향으로의 깊이를 각각 나타낸다. 붕소가 실리콘에 이온 주입된 농도분포는 대칭적인 가우스 분포와는 다른 비대칭분포를 나타낸다. 실리콘기판의 표면에서 후방산란에 따른 반사효과를 고려하면 가우스분포와는 다른 형태의 수식으로 표현될 수가 있다. 이 경우에  $y$  축 방향의 측면분포를 나타내는  $\Delta R_L$ 는 일정한 값을 나타내지 않고 깊이에 따라 변하는 수식으로 (8-1), (8-2), (8-3)에 나타내었다.

$$\Delta R_L = \Delta \overline{R}_L \sqrt{1 + a + bx^* + cx^{*2}}, y \leq R_p \tag{8-1}$$

$$\Delta R_L = \Delta \overline{R}_L \sqrt{\exp(1 + p + qx^* + rx^{*2})}, y \geq R_p \tag{8-2}$$

$$x^* = \frac{x - R_p}{\Delta R_p} \tag{8-3}$$

여기서  $\Delta \overline{R}_L$ 는 측면방향에서 표준편차의 평균값을 나타낸다. 수식 (8)에서  $a, b, c, p, q$ 와  $r$ 는 fitting 변수이다. 이러한 변수의 값은 다음과 같다. 붕소가 실리콘에  $7^\circ$ 로 입사된 경우에  $a= 0.1, b= 0.5, c= 0.1, p= 0.8, q= 0.8, r= 0.3$ 이고  $0^\circ$ 로 입사된 경우에는  $a= 0.12, b= 0.24, c= 0.12, p= 0.8, q= 0.8, r= 0.3$ 과 같다. 근사적인 방법으로 다음과 같은 조건 (8-4)를 수식 (7)과 수식 (9)에 적용하여 3-D의 농도분포를 나타낼 수 있다.

$$\Delta R_L = \Delta R_z \tag{8-4}$$

본 모델의 해석에서 적용된  $\Delta \overline{R}_L$ 의 값은  $0^\circ$ 에서  $0.1101 \mu\text{m}$ 이고  $7^\circ$ 에서  $0.1274 \mu\text{m}$ 로 SRIM 컴퓨터시뮬

레이션을 통해서 얻을 수 있었다. 경사된 이온주입의 경우는 본 논문에서 수식 (7)과 함께 다른 수식들 9, 10, 11와 12로 나타낼 수가 있다. 다음의 수식 9에서  $a$ 는 측면방향으로의 마스크의 폭을 나타내며,  $\alpha$ 는 tilting 시에 수직방향으로부터 기울어진 각도를 나타내고 있다.

$$\frac{C(x,y,z)}{C_{\max}(z)} = \frac{\text{Exp}\left(\frac{((x-a)\tan(\alpha)-(y-R_p)^2)}{2\Delta R_p^2 C_f^2}\right)}{2C_f} \times$$

$$\frac{1}{2} \left[ \text{erfc}\left(\frac{(x-a) + \tan(\alpha)\left(\frac{\Delta R_L}{\Delta R_p}\right)^2 (y-R_p)}{\sqrt{2} \Delta R_L C_f}\right) \right.$$

$$\left. - \text{erfc}\left(\frac{(x+a) + \tan(\alpha)\left(\frac{\Delta R_L}{\Delta R_p}\right)^2 (y-R_p)}{\sqrt{2} \Delta R_L C_f}\right) \right] +$$

$$\frac{\text{Exp}\left(\frac{-((x-a)\tan\beta-(y-R_p)^2)}{2\Delta R_L^2 C_e^2}\right)}{2C_e} \times$$

$$\frac{1}{2} \left[ \text{erfc}\left(\frac{-(x-a) + \tan(\beta)\left(\frac{\Delta R_L}{\Delta R_p}\right)^2 (y-R_p)}{\sqrt{2} \Delta R_L C_e}\right) - \right.$$

$$\left. \text{erfc}\left(\frac{-(x+a) + \tan(\beta)\left(\frac{\Delta R_L}{\Delta R_p}\right)^2 (y-R_p)}{\sqrt{2} \Delta R_L C_e}\right) \right]$$

여기서  $\beta$ ,  $C_{\max}$ ,  $C_f$ ,  $C_e$  는 다음과 같다.

$$\beta = 90 - \alpha \quad (10)$$

$$C_{\max}(z) = \frac{C_{\text{dose}}}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} \text{Exp}\left(\frac{z^2}{2\Delta R_z^2}\right) \quad (11)$$

$$C_f = \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta R_L \tan(\alpha)}{\Delta R_p}\right)^2}$$

$$C_e = \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta R_L \tan(90 - \alpha)}{\Delta R_p}\right)^2} \quad (12)$$

## 2. 실험 방법

### 2.1 컴퓨터시뮬레이션과 실험데이터와 비교

#### 2.1.1 개발된 해석적인 3D 모델

본 논문에서 제시한 3-D 모델은 Gambit [11-15] 과 Fluent [16-20] 프로그램들을 사용하였다. 제시한 이 3-D 모델은 Gambit 프로그램으로 그리드와 삼차원적인 구조를 만든 다음 Fluent 프로그램에 수식 7에서 12를 C++ 프로그램으로 작성하여 적용한 결과를 그림 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 15에 각각 나타내었다. 주입된 이온들의 분포와 확산된 농도분포를 3-D 모델로 해석하기 위한 순서는 다음과 같다.

1. Gambit 프로그램을 사용하여 3-D (three dimensional) 구조와 grid를 생성한다.
2. 제시한 수식들을 Fluent에 적용하여 3-D 구조의 profiles를 정의한다.
3. 더 좋은 정확성과 수렴을 위한 매개변수조건에서 높은 분할을 고려한다.
4. Multi-grid gauss seidel 방법 [16-20]을 사용하여 각각의 시간 스텝에서 정의된 값을 구한다.

#### 2.2 실험 조건 및 컴퓨터시뮬레이션

본 실험에서 비저항이 1~2  $\Omega\text{cm}$ 이고 인 (phosphorus)이 도핑된 n 타입의 (100)의 4 inch 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 웨이퍼의 세정 (cleaning) 후에 마스크 구조는 MOS (metal oxide semiconductor) 공정으로 제작되었다. 실리콘에 p타입의 도핑을 위해서, 붕소 (boron)가  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 의 도즈 (dose)이고 200 keV에서  $0^\circ$ 와  $7^\circ$  wafer tilt 조건에서 스캔속도는 5 cm/sec로 이온주입을 하였다. 주입된 붕소이온들은 전기적인 활성화를 위해서 질소가스분위기에서  $1,000^\circ\text{C}$ 에서 10초 간 급온열처리 (RTA) 하였다 [21,22]. 본 연구에서는 주입된 붕소이온들의 분포를 나타내기 위해서 가우스와 후방산란을 가진 가우스모델을 사용하여 1-D, 2-D 및 3-D 모델들을 각각 해석할 수가 있었다. 일차원적인 분포는 SRIM 및 SIMS 데이터와 서로 비교하였고 이차원적 데이터는 에칭 후에 측정된 SEM 데이터와 비교하여 본 연구에서 제시한 3-D 모델의 정당성을 입증할 수가 있었다. 서로 다른 입사각으로 주입된 붕소이온들의 농도분포를 그림 1에 나타내었다. 컴퓨터시뮬레이션 SRIM의 결과로부터  $0^\circ$ 와  $7^\circ$ 인 경우  $0^\circ$ 인 경우는  $0.583 \mu\text{m}$ 에서  $3.2 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$  농도를  $7^\circ$ 인 경우는 다소 얇은 깊이인  $0.571 \mu\text{m}$ 에서  $3.08 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$  농도를 각각 나타내었다. 측정된 SIMS 데이터로부터  $0^\circ$ 인 경우는  $0.545 \mu\text{m}$ 에서  $1.94 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ ,  $7^\circ$ 인



Fig. 1. Boron profiles measured using SIMS from different angles.

경우는 다소 얇은 깊이인  $0.533 \mu\text{m}$ 에서  $1.96 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 의 농도들을 각각 나타내었다. SRIM 시뮬레이션을 통하여 붕소의  $\Delta \overline{R}_L$  값은  $0^\circ$ 에서  $0.1101 \mu\text{m}$ 이고  $7^\circ$ 에서  $0.1274 \mu\text{m}$ 임을 각각 구할 수 있었다.

이 결과는 tilting 조건 때문에  $7^\circ$ 에서의 lateral straggling이  $0^\circ$ 에서 보다도 측면방향으로 약간 더 크게 나타났음을 확인할 수가 있다. 스퍼터링 (sputtering) 효과는 상대적으로 높은 에너지로 가벼운 붕소이온이 주입된 경우이기 때문에 거의 무시할 수가 있고 SRIM 시뮬레이션의 결과로부터도 입증되었다. 또한 제안한 본 모델은 3-D 분포를 나타낼 수가 있고 2-D의 데이터는 측정된 SEM 데이터와 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 그러나  $0^\circ$ 와  $7^\circ$ 에서 후방산란 (backscattering) 효과는 1-D, 2-D에서 각각 영향을 나타내었다. 수식 1-5를 적용하여 SIMS 데이터로부터 계산한 결과와 SRIM 컴퓨터시뮬레이션으로부터 얻은 moments값들을 표 1에 나타내었고 열처리한 데이터는 표 2와 그림 2에 나타내었다.  $0^\circ$ 에서 주입된 프로파일의 꼬리부분은 채널링 (channeling) 효과 때문에  $7^\circ$  보다도 더 깊은 모양을 나타내었다. 열처리 후의 SIMS 데이터는 표 2에 나타내었다. 열처리한 profiles는 1-D의 경우에  $\Delta R_p$ 와  $\beta$  때문에 다소 더 넓은 모양을 나타내었다. 그림 2에서  $\gamma$ 가 음 (negative)의 값을 가지기 때문에 무게중심이 다소 오른쪽으로 이동한 형태를 확인할 수가 있다.

그림 3에 SIMS 데이터와 가우스 모델이 잘 일치하는 결과를 그림 3에 나타내었다.

가우스모델은 그림 7과 10에서 나타난 2-D의 그림에

Table 1. Moments from SIMS and SRIM simulations.

Angle	$0^\circ$ degree		$7^\circ$ degree	
	SIMS	SRIM	SIMS	SRIM
Moments				
$R_p$ ( $\mu\text{m}$ )	0.525	0.5169	0.513	0.513
$\Delta R_p$ ( $\mu\text{m}$ )	0.115	0.0871	0.112	0.086
$\gamma$	0.332	1.574	0.583	1.491
$\beta$	4.2	6.84	5.31	6.45

Table 2. The annealed SIMS data from the different implanted angles.

Angle	Annealed $0^\circ$	Annealed $7^\circ$
	SIMS	SIMS
Moments		
$R_p$ ( $\mu\text{m}$ )	0.525	0.513
$\Delta R_p$ ( $\mu\text{m}$ )	0.1128	0.109
$\gamma$	0.531	0.793
$\beta$	5.77	5.31

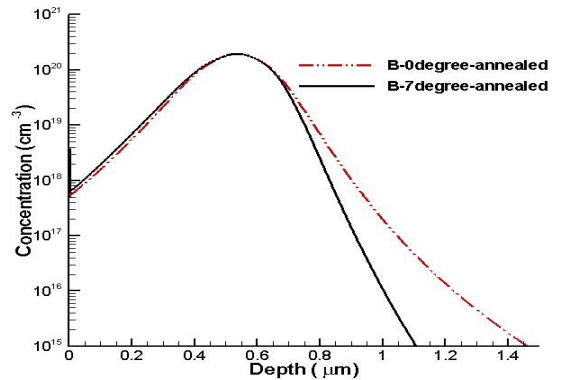


Fig. 2. Boron profiles annealed using ICECREM simulation from different angles.

서 측면방향에서 중심인 0점에서 수직방향 아래로 절단함으로써, 가우스모델을 이용한 1-D의 데이터를 얻을 수가 있었다. 또한 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 표면에 반사효과를 고려한 본 논문에서 제안한 해석적인 모델의 결과는 그림 8과 11로부터 발췌된 (extracted) 1-D의 데이터는 그림 3에서 단지 가우스 모델을 적용한 경우와 비교해서 SIMS 데이터와 다소 더 잘 일치하는 결과를 그림 4에 나타내었다. 입사각이  $7^\circ$ 에서의 가우스모델은 표면에서 최대농도영역까지는 SIMS 데이터와 잘 일치하지만 프로파일의 꼬리

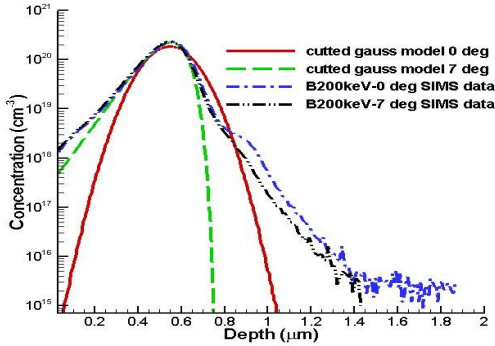


Fig. 3. Gauss model of boron profile is compared with SIMS data.

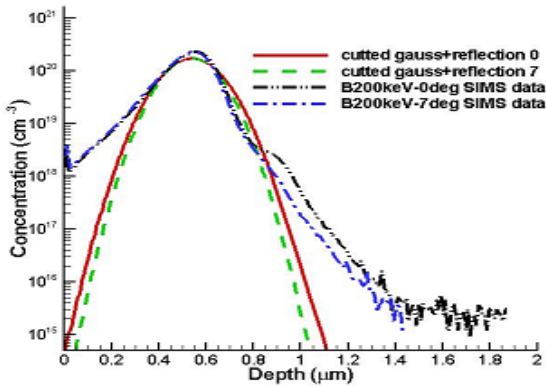


Fig. 4. Gauss model considered reflected ions for the boron profile is compared with SIMS data.

부분에서는 잘 일치하지 못한 결과를 나타내었다. 그림 5에서 알 수 있듯이 450 keV에서 핵정지력  $S_n$  (nuclear stopping power)이  $1.068 \text{ eV/\AA}$ 의 값으로 나타나지만, 실제로는 SRIM 시뮬레이션의 좋은 통계 (good statistic) 효과를 고려한다면 100,000만 개 이상의 주입된 이온들을 고려할 때에 350 keV에서 후방산란된 이온 (backscattered ions)들은 100,000 개의 주입된 이온 가운데서 50개 이하로 나타났다. 이때에 전자정지력  $S_e$  (electronic stopping power)은  $52.07 \text{ (eV/\AA)}$ 이고  $S_n$ 은  $1.283 \text{ (eV/\AA)}$ 으로 그림 5에 각각 나타내고 있다. 즉 350 keV 이상의 에너지에서 붕소 이온주입은 거의 반사효과 없이 모든 이온들이 실리콘기관에 주입된다는 것을 나타내고 있다. 제시된 본 모델은 무거운 기관에서 가벼운 이온들의 반사효과를 고려함으로써 SIMS 데이터와 잘 일치함을

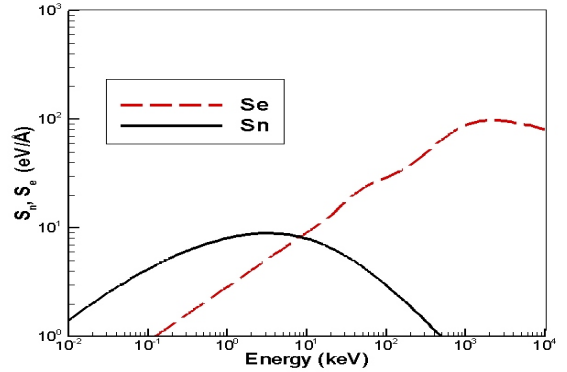


Fig. 5. Electronic and nuclear stopping power of  $^{11}\text{B}$  implanted silicon in energy region.

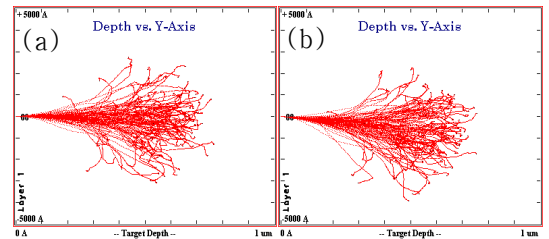


Fig. 6. The simulated trajectory of boron ions in implanted silicon with different angles. (a)  $0^\circ$  incident, (b)  $7^\circ$  incident.

나타내어 SRIM 시뮬레이션의 결과를 근거로 하여 350 keV 아래의 에너지영역에서 다양하게 적용할 수 있는 모델임을 검증하였다 [10].

서로 다른 입사각으로 부터, 주입된 붕소이온의 one-point 분포를 나타내는 SRIM 시뮬레이션의 결과는 그림 6에 각각 나타내었다.  $7^\circ$  입사각의 빔은 수평방향에서 다소 아래방향으로 치우쳐진 형태의 분포를 그림 6(b)에 나타내었다. 확산처리 전 및 후의 경우에 붕소의 2-D 가우스 분포는 대칭적인 형태로 매우 적은 확산효과 때문에 별 차이가 없이 그림 7(b)에 나타내었다.  $0.583 \mu\text{m}$ 의 깊이에서 농도는  $2.15 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 을 나타내었다.

전기적인 활성화를 위해서 붕소가 주입된 실리콘 기관은 RTA를 사용하여  $1,000^\circ\text{C}$ 에서 10초 간 열처리를 수행하였고 확산된 프로파일들은 그림 8에 나타내었다. RTA로 매우 짧은 시간 동안 열처리하였기 때문에 확산효과는 거의 나타나지 않았다. 확산계수 [23,24]는 수식 13에 나타내었다.

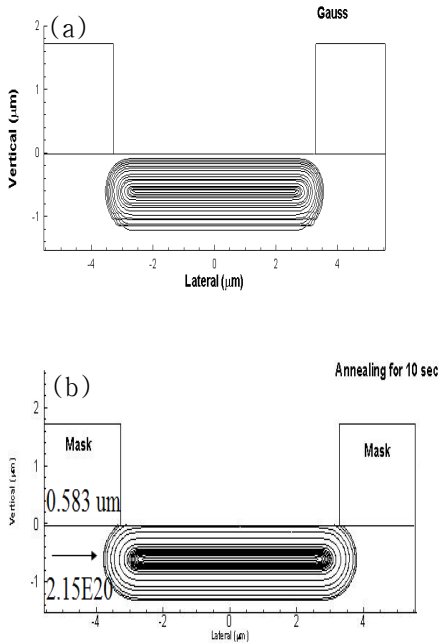


Fig. 7. Gauss model of boron profiles with 0° implantation (a) before and (b) after annealing.

$$D = 6.127 \times 10^{-15} [cm^{-2}/sec] \quad (13)$$

표면에서 후방산란효과를 고려한 모델을 적용한 결과를 그림 8에 나타내었다. 가우스 분포와는 다소 다른 2-D의 형태를 나타내고 있음을 확인할 수가 있다. 0.563  $\mu m$ 의 깊이에서  $2.27 \times 10^{20} cm^{-3}$  농도를 나타내고 있다. 2-D 분포를 나타내기 위해서 선택적 화학에칭을 통하여 같은 농도를 나타내는 등고선의 윤곽을 묘사하는 방법들은 광범위하게 연구가 되어져 왔고 또한 발표 [25-28] 되어져 왔다.

실리콘웨이퍼는 cleaning 후에 건식산화를 통하여 450 Å의 산화층과 LPCVD를 이용하여 1.7  $\mu m$ 의 폴리실리콘을 각각 증착하였다. 폴리실리콘과 SiO<sub>2</sub> 층들은 plasma 식각과 산화층의 식각 후에 마스크의 두께는 0.78  $\mu m$ 로 나타났고 마스크의 폭은 5.88  $\mu m$ 이었다. 마스크 아래로 침투한 깊이는 0.25  $\mu m$ 로 나타났다.

측정된 윤곽선의 농도는 0.43  $\mu m$ 에서  $9.84 \times 10^{19} cm^{-3}$ 이었다. RTA로 1,000°C에서 10초 간 열처리를 수행한 후에 화학용액 (HF: HNO<sub>3</sub>: CH<sub>3</sub>COOH= 1:3:8)에 10초 간 담그면서 동시에 500 W의 램프로 빛을 조사하였다.

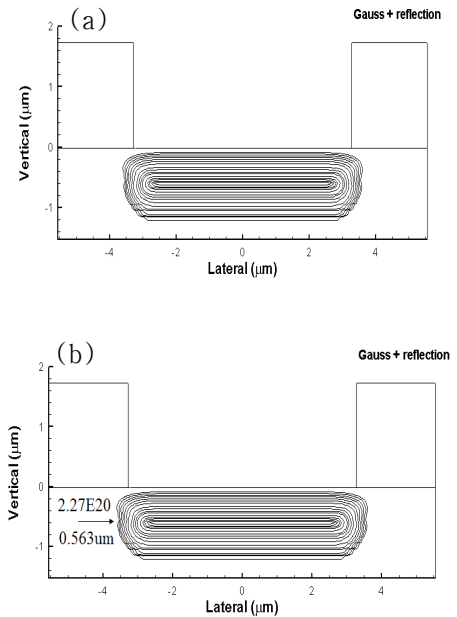


Fig. 8. Analytical model of boron profiles with 0° implantation and reflection effects (a) before and (b) after annealing.

이때에 실리콘의 시료와 램프 사이의 간격은 10 cm이었다. 측정된 SEM 데이터는 그림 9와 12에 각각 나타내었다. 램프를 조사하는 이유는 더 좋은 해상도의 데이터를 얻을 수 있기 때문이다.

그림 9에서 마스크 아래에 측면/수직 방향의 비는 0.58을 나타내었다.

7°의 각도로 주입한 경우에 가우스 모델을 적용한 봉소의 2-D 분포는 그림 10에 나타내었다. RTA의 매우 짧은 시간 때문에 확산효과의 차이는 거의 없었다.

표면에서 후방산란효과를 고려한 2-D의 분포는 그림 11에 나타내었다. 그림 11(b)에서 0.521  $\mu m$ 의 깊이에서  $2.16 \times 10^{20} cm^{-3}$ 을 나타내고 있다. 7°의 각도로 주입된 봉소의 2-D 분포를 에칭 후에 SEM으로 측정된 데이터를 그림 12에 나타내었다. 7°의 각도로 tilting 하였음에도 불구하고 농도등고선들은 가우스분포와 비슷한 분포들을 나타내었다. 그러나 두 번째 선은 화학용액과 사용된 램프의 빛 조사에 의해서 약간 구부러지게 나타났다.

그림 12는 화학적인 에칭 후에 SEM으로 측정된 세 개의 윤곽선으로부터 나타내어진 농도들은 깊이가 0.524  $\mu m$ 에서  $1.0 \times 10^{19} cm^{-3}$ , 0.74  $\mu m$ 에서  $2.1 \times 10^{20} cm^{-3}$ , 1.33  $\mu m$ 에서  $1.0 \times 10^{16} cm^{-3}$ 로 각각 나타났다.

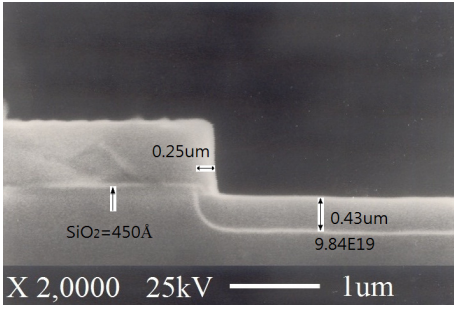


Fig. 9. Diffused boron profiles with 0° incident implantation.

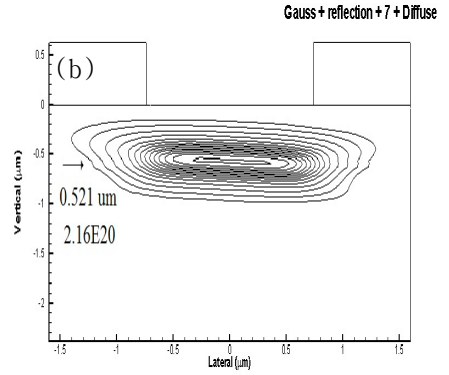
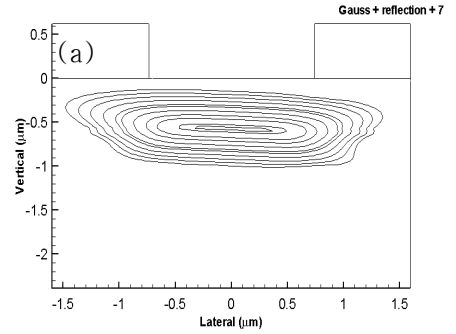


Fig. 11. Analytical model of boron profiles with 7° implantation with reflection effects (a) before and (a) after annealing.

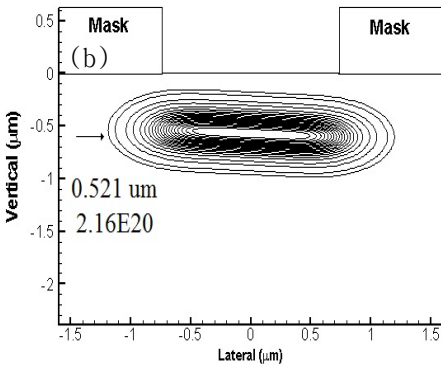
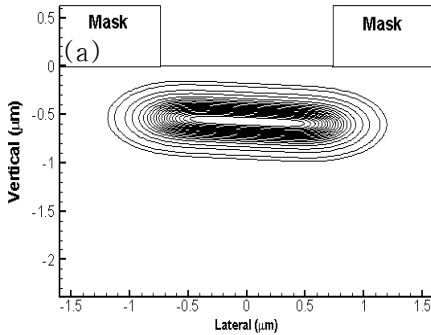


Fig. 10. Gauss model of boron profiles with 7° implantation (a) before and (b) after annealing.

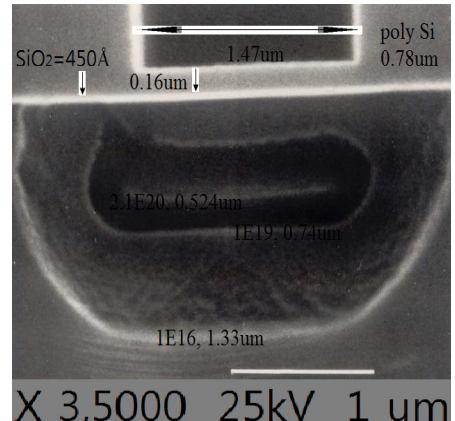


Fig. 12. Diffused boron profiles using 7° incident implantation.

3-D 농도분포를 나타내기 위해서, 마스크의 코너에서 절단한 구조를 그림 13에 나타내고 있다. 이러한 부분은 CMOS 구조나 3-D chip, MEMS 구조의 소자들을 해석 및 판정하고자 할 때에 중요한 척도가 된다. 3-D 구조의 투시도는 그림 14와 15에 각각 나타내었다.

그림 14에서 (b)그림이 다소 확산효과에 의해서 코너에서 더 넓게 퍼진 농도분포를 나타내고 있음을 알 수가 있다.

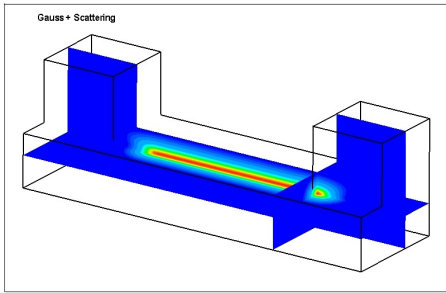


Fig. 13. Three dimensional boron profiles through the cutting at right edge.

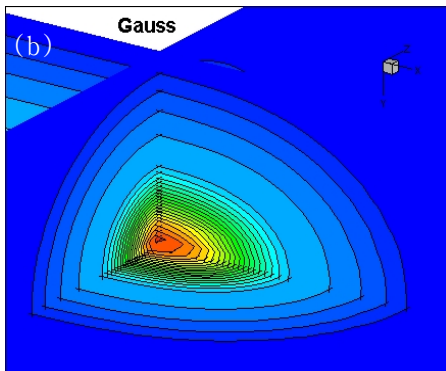
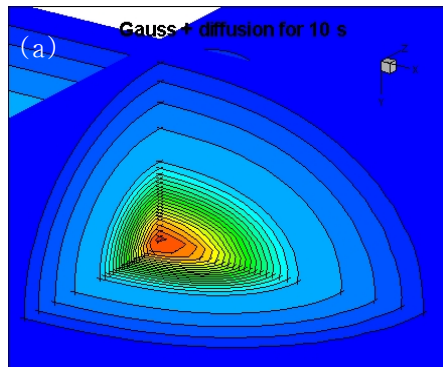


Fig. 14. Three-dimensional gauss model of implanted and diffused boron profiles at the cutting position. (a) implanted profiles, (b) diffused profiles.

표면에서 후방산란효과 (backscattering) 를 고려한 결과는 그림 15에 나타내었다. 3-D로 나타낸 확산효과는 단지 가우스모델을 사용한 경우보다도 표면 가까이에서 후방산란효과 때문에 확산효과가 다소 적게 나타남을 알 수 있다.

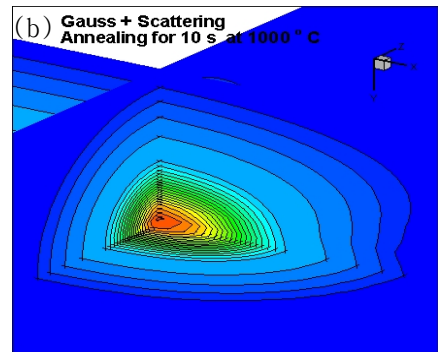
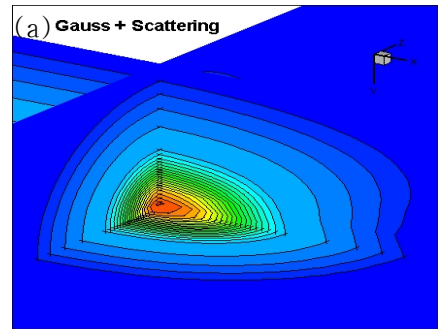


Fig. 15. Three dimensional analytical model of implanted and diffused boron profiles with the reflection effects at cutting position. (a) implanted profiles, (b) diffused profiles.

### 3. 결과 및 고찰

PMOS에서 주입된 붕소의 분포는 Cameca 6f의 SIMS를 이용하여 1-D 데이터를 측정하였고 화학적인 에칭과 빛을 조사한 다음 SEM으로 측정된 2-D 분포를 나타내었다. 본 논문에서 제시한 3-D 모델은 실험 데이터와 비교하여 1-D 및 2-D의 결과와 잘 일치하고 있음을 확인하였다. HF:HNO<sub>3</sub>:CH<sub>3</sub>COOH=1:3:8의 화학적 에칭용액을 사용하여 좋은 해상도를 나타내는 2-D 분포를 얻을 수 있었다. 소스와 드레인영역의 코너부분 뿐만 아니라 어떠한 영역에서도 1-D에서 3-D 까지 농도 분포를 구할 수 있는 방법을 본 논문에서 제시하였으며, 표면 가까이에서 후방산란효과를 나타내는 모델을 개발하여 해석적인 방법을 적용하여 측정된 데이터들과 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 1-D의 경우에는 SRIM, ICECREM 및 제시한 해석적인 모델 모두가 SIMS 데이터와 잘 일치하였다. 측정된 SIMS 데이터로부터 1-D 데이터의 모멘트를 계산하여 2-D, 및 3-D의 분포에 적용하였다. 본 논문

에서 제시한 모델의 2-D 데이터는 SEM으로 측정된 2-D의 데이터와 비슷한 결과를 나타내었다.

#### 4. 결론

가우스모델은 대체적으로 SEM 데이터와 잘 일치하지만 1-D의 경우에는 제시한 모델이 단지 가우스모델을 사용한 경우보다 더 좋은 결과를 나타냄을 데이터들을 서로 비교하여 확인하였다. 화학적인 에칭방법은 실리콘에서 단지 전기적으로 활성화된 도핑농도만을 나타낼 수가 있다. 또한 이 방법은 PMOS의 경우에 최소한으로 측정될 수 있는 측정한계는  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 의 농도를 나타내었다. 이러한 측정한계는 사용된 화학용액의 혼합비와 에칭시간, 샘플과 램프사이의 간격, 사용된 램프의 출력에 따라서 다소 다른 분포를 나타낼 수 있다. 에칭 및 SEM 측정방법은 2-D를 나타낼 수 있는 좋은 방법이지만, 소자의 크기가 나노소자의 스케일로 줄어들게 되면 특히 수직보다 측면방향으로의 낮은 해상도 때문에 새로운 측정방법의 개발이 절실히 요청된다. 그러나 고해상도의 측정 tool인 TEM (transmission electron microscope)을 [3] 사용하더라도 나노스케일에서는 여러 개의 농도 윤곽선들을 쉽게 얻을 수가 없다. 왜냐하면 선풍이 좁아진 소자 및 집적회로에서는 식각이 더 빨리 나타나기 때문이다. 그림 14와 15에서 나타난 붕소의 3-D 분포는 임의적인 경사나 회전 của 이온 주입조건에서도 단면과 다양한 구조에서도 이온분포를 알 수가 있고 신뢰할 수 있는 공정조건을 확립할 수 있다고 사료된다. 또한 제시된 모델은 집적회로에서 3-D chip의 해석 및 디자인이나, MEMS 구조 및 특수한 소자들의 해석에도 이용이 될 것으로 사료된다.

#### REFERENCES

- [1] W. D. Rau, P. Schwander, F. H. Baumann, W. Hoepfner, and A. Ourmazd, *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 2614 (1999).
- [2] D. Yoo, C. D. Marsh, and G. R. Booker, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 87 (2002).
- [3] W. C. Jung, *J. Korean Phys. Soc.*, **46**, 1218 (2005).
- [4] H. Ryssel, J. Lorenz, and W. Kreuger, *Nucl. Inst. Phys. Res.*, **B19**, 45 (1987).
- [5] User' Guide, "ICECREM 1996 manual" Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS B) (1996).
- [6] H. Ryssel and I. Ruge, *Ion Implantation* (Wiley, New York, 1986) p.78.
- [7] J. P. Biersack and L. G. Haggmark, *Nucl. Inst. and Meth.*, **174**, 257 (1980).
- [8] U. Littmark and J. F. Ziegler, *Phys. Rev.*, **A23**, 64 (1981).
- [9] J. P. Biersack and J. F. Ziegler, *Ion Implantation Techniques* (Springer Verlag, Berlin, 1982) p. 125.
- [10] J. F. Ziegler, *SRIM 2008 manual*, <http://www.srim.org> (2008).
- [11] C. T. John Peng and Nathan W. Cheung, *Nucl. Inst. Phys. Res.*, **B74**, 222 (1993).
- [12] M. M. Karim, M. M. Rahman, and M. A. Alim, *J. Sci. Res.*, **1**, 209 (2009).
- [13] T. J. Tautges, *Inst. J. Numer. Meth. Engng.*, **50**, 2617 (2001).
- [14] User' Guide, *GAMBIT 2.0, Manual, Fluent Inc.*, (2002).
- [15] S. J. Owen, D. R. White, and T. J. Tautges, *In Proc. 11th International Meshing Roundtable* (Ithaca, New York, USA, 2002) p. 297.
- [16] Z. Luan and M. M. Khonsavi, *J. Tribol.*, **120**, 120 (2007).
- [17] A. Riddle, A. Carruthens, A. Sharpe, C. McHugh, and J. Stocker, *Atmos. Env.*, **38**, 1029 (2004).
- [18] K. H. Weiner, D. G. Carey, A. M. McCarthy, and T. W. Sigmon, *Micro Elec. Eng.*, **20**, 107 (1993).
- [19] N. Toljic, K. Admiak, G. S. P. Castle, H. Kuo, and H. Fan, *J. Electrostatics*, **69**, 189 (2011).
- [20] C. M. Balan, D. Broboana, and C. Balau, *Int. J. Heat Fluid Flow.*, **31**, 1125 (2010).
- [21] W. C. Jung, *J. KIEEME*, **9**, 881 (1997).
- [22] A. Mokhberi, P. B. Griffin, J. D. Plummer, E. Paton, S. McCoy, and K. Elliot, *IEEE Trans. Elec. Dev.*, **49**, 1183 (2002).
- [23] B. El Kareh, *Fundamentals of Semiconductor Processing Technology* (Kluwer Academic Pub. Boston, 1998) p. 278.
- [24] S. Robertson, Brindos, K. S. Jones, and Mark E. Law, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 3844 (1999).
- [25] L. Gong, L. Frey, S. Bogen, and H. Ryssel, *Nucl. Inst. Phys. Res.*, **74**, 186 (1993).
- [26] J. S. McMurray, J. Kim, and C. C. Williams, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B15**, 1011 (1997).
- [27] A. K. Henning, and T. Hochwitz, J. Slinkman, S. Hoffmann, P. Kaszuba, and C. Daghljan, *J. Appl. Phys.*, **77**, 1888 (1995).
- [28] A. L. Magna, G. D'Arrigo, and G. Garozzo, *Mat. Sci. Eng.*, **B102**, 43 (2003).