

## 낮은 에너지로 실리콘에 이온 주입된 분포와 열처리된 인듐의 거동에 관한 시뮬레이션과 모델링

정원채<sup>a</sup>

경기대학교 전자공학과

### Modeling and Simulation on Ion Implanted and Annealed Indium Distribution in Silicon Using Low Energy Bombardment

Won-Chae Jung<sup>a</sup>

Department of Electronic Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Korea

(Received September 8, 2016; Revised October 18, 14, 2016; Accepted October 21, 2016)

**Abstract:** For the channel doping of shallow junction and retrograde well formation in CMOS, indium can be implanted in silicon. The retrograde doping profiles can serve the needs of channel engineering in deep MOS devices for punch-through suppression and threshold voltage control. Indium is heavier element than B, BF<sub>2</sub> and Ga ions. It also has low coefficient of diffusion at high temperatures. Indium ions can be cause the erode of wafer surface during the implantation process due to sputtering. For the ultra shallow junction, indium ions can be implanted for p-doping in silicon. UT-MARLOWE and SRIM as Monte carlo ion-implant models have been developed for indium implantation into single crystal and amorphous silicon, respectively. An analytical tool was used to carry out for the annealing process from the extracted simulation data. For the 1D (one-dimensional) and 2D (two-dimensional) diffused profiles, the analytical model is also developed a simulation program with C++ code. It is very useful to simulate the indium profiles in implanted and annealed silicon autonomously. The fundamental ion-solid interactions and sputtering effects of ion implantation are discussed and explained using SRIM and T-dyn programs. The exact control of indium doping profiles can be suggested as a future technology for the extreme shallow junction in the fabrication process of integrated circuits.

**Keywords:** Indium ion implantation, Sputtering, Annealing, Computer simulation

#### 1. 서 론

현재 CMOS (complementary metal oxide semiconductor) 반도체집적회로의 제작에서 채널도핑,

retrograde well 형성, 문턱전압의 조정뿐만 아니라 매우 얇은 p-n 접합 형성을 통한 다이오드, 트랜지스터를 비롯한 다양한 소자의 도핑기술에도 응용 [1-3]이 되고 있으나, 실제로 다결정, 비정질 실리콘 기판에 인듐이온을 주입하여 다양한 에너지 영역에서 농도분포를 발표한 논문은 국내/외를 비롯하여 매우 적은 편이다. 특히 국내 논문은 현재까지 발표된 논문이 거의 없는 편이다. 따라서 본 연구에서는 Monte carlo 이온 주입 컴퓨터 시뮬레이션 tool인 SRIM [4-6]과

a. Corresponding author; [wchung@kgu.ac.kr](mailto:wchung@kgu.ac.kr)

Copyright ©2016 KIEEME. All rights reserved.  
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

UT-MARLOWE [7-9] 프로그램을 이용하여 단결정 및 비정질 실리콘기판에 인듐이온 주입을 실행하여 농도 분포를 나타내었다. 특히 UT-MARLOWE 시뮬레이션 결과들은 단결정기판에서 SIMS 데이터와 잘 일치하는 결과를 나타내었다 [7-11]. 가우스 분포를 나타내는 이온분포는 수식 (1)에 나타내었다.

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

인듐은 원자번호가 49이고 원자질량이 114.82 amu. 를 나타내는 기존의 붕소, 갈륨, 알루미늄, BF<sub>2</sub> 분자 이온등과 비교해서 매우 무거운 3족의 p타입 불순물 원소이다. 또한 인듐의 용융점은 156.6°C로 매우 낮은 편이다. 따라서 실리콘에 이온 주입된 인듐의 확산 모델은 현재까지 자세히 나타나 있지 않다. 또한 낮은 에너지(10~50 keV)에서 sputtering 효과가 매우 크게 나타나서 실리콘웨이퍼의 표면에서 부식층 (eroded layer)이 나타나게 된다. 이러한 sputtering 효과는 T-dyn [12-15] 시뮬레이션을 통하여 그 결과를 그림으로 나타내었다. 10~50 keV의 에너지 영역에서 인듐 이온 주입을 통하여 단결정실리콘이 비정질화 되는 이온 주입량은 약 3.8×10<sup>14</sup> cm<sup>-2</sup>의 dose를 나타내었다. 실리콘에서 인듐의 확산계수는 다음의 수식으로 나타내어진다. 500°C에서 1,100°C 사이의 온도 영역에서 수식 (2)와 같이 나타낼 수 가 있다.

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_A}{kT}\right) \quad (2)$$

여기서 D<sub>0</sub>=16.5, E<sub>A</sub>=3.9 eV 이다. 1×10<sup>15</sup> cm<sup>-2</sup> 이상의 높은 dose로 인듐이 주입된 경우는 최대 농도가 약 1.8×10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup> 이상의 영역에서 precipitation의 상태로 나타나서 전기적으로 일부분이 활성화하지 않은 상태로 그대로 있음을 확인할 수가 있었다. 그러나 CMOS IC의 halo 이온 주입의 경우는 약 1×10<sup>13</sup> cm<sup>-2</sup>의 낮은 dose로 주입하는 경우에는 전기적인 활성화가 증가함을 나타내었다. 인듐의 이온주입 후에 산화과정에서 SiO<sub>2</sub>막에서의 확산은 실리콘에서 보다 다소 낮은 확산계수를 나타낸다고 발표하였으나 SiO<sub>2</sub>/Si의 경계면에서 분리 현상(segregation) 등의 복잡한 계면 현상 때문에 정확한 확산현상의 물리적인 규명이 아직도 요구되는 실정이다. SiO<sub>2</sub>층에서 불순물 인듐의 확산계수는 수식 (2)에서 D<sub>0</sub>=7×10<sup>-6</sup>, E<sub>A</sub>=2.0의 값을 나

타내어서 실리콘에서 보다 훨씬 더 확산계수가 작음을 나타내었다. 그리고 SiO<sub>2</sub>층에서 농도 분포의 끝부분에서 작은 농도 피크가 추가로 나타남을 확인하였다. 복잡한 확산 과정 때문에 본 연구에서는 실리콘에서 주입된 이온의 분포와 확산 후에 이온들의 거동에 따른 재분포를 해석적인 모델로 제시하고자 한다. 이온 주입된 인듐의 분포는 피어슨 분포에서 다소 가우스분포에 가까운 분포로 나타난다. 열처리 후에 시간에 따른 확산된 재분포를 나타내는 해석적인 수식은 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$C(x,t) = \left[ \frac{C_{dose}}{\sqrt{2\pi(2Dt + \Delta R_p^2)}} \times \exp\left(\frac{-(x-R_p)^2}{2(2Dt + \Delta R_p^2)}\right) - \exp\left(\frac{(x+R_p)^2}{2(2Dt + \Delta R_p^2)}\right) \right] \quad (3)$$

수식 (3)은 이온 주입량 즉 dose<1×10<sup>15</sup> cm<sup>-2</sup>의 조건에서는 실험 데이터와 매우 잘 일치함을 나타내었다. 확산동안에 out diffusion에 따른 dose 손실은 다음의 수식 (4)로 나타낼 수가 있다.

$$D_{Loss} = C_{Dose} \operatorname{erfc}\left(\frac{R_p}{\sqrt{2(2Dt + \Delta R_p^2)}}\right) \quad (4)$$

또한 기판에 마스크 없이 전면을 이온 주입하는 blanket 도핑 농도의 분포는 다음의 수식들로 나타낼 수 있다.

$$C_{diffused}(x,y,t) = C(x,t) \times \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{y-a}{\Delta R_L^1}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{y+a}{\Delta R_L^1}\right) \right] \quad (5)$$

여기서 C(x,t)는 수식 (3)을 나타내고 ΔR<sub>L</sub>은 열처리전의 측면 분포를 나타낸다. 또한 a는 측면 방향으로의 mask의 폭을 나타내고 있다. 확산된 측면 방향으로의 계산은 열처리전의 측면방향 ΔR<sub>L</sub>을 확산된 인자만큼 곱해준 수식으로, 수식 (6)에 나타내었다.

$$\Delta R_L^1 = \Delta R_L \times \frac{R_p(\text{diffused})}{R_p} \quad (6)$$

그러나 마스크가 있는 구조의 도핑 농도의 2차원 분포는 중첩의 원리를 적용한 수식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$C(x,y) = C_{vert}(x) \times C_{lat}(x,y), \quad (7)$$

$$C_{lat}(x,y) = a \times \exp(-|by|^p)$$

여기서  $a$ ,  $b$ ,  $p$ 는 이온 주입량에 따른 변수이고 Boltzmann transport program [16,17]을 적용한 모멘트 계산으로부터 나온 데이터를 적용한 것이다.

## 2. 실험 방법

SRIM과 UT-Marlowe 프로그램을 이용하여 이온 주입 컴퓨터 시뮬레이션에서 good statistics를 위해서 100만 개의 history number를 적용하였다. 열처리 후에 나타나는 인듐이온의 도핑 분포를 수식적인 해석 방법으로 확산 분포를 나타내기 위해서 확산된 1차원의 분포는 수식 (1)에서 (4)를 적용하여 Matlab을 사용하여 결과를 나타내었고, 2차원의 해석적인 분포는 C++ 프로그램으로 작성하여 시뮬레이션 격자를 형성하고 확산된 2차원의 분포를 그림 17에 나타내었다.

### 2.1 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 인듐 이온 주입된 실리콘기판의 물리적인 특성분석

T-dyn simulation tool 을 이용하여 dose  $1 \times 10^{14}$   $\text{cm}^{-2}$  및  $1 \times 10^{15}$   $\text{cm}^{-2}$ 로 실리콘에 인듐 이온 주입에서 입사각에 따른 erosion rate와 sputtering yield를 그림 1 부터 그림 4까지 나타내었다. 인듐의 dose가  $1 \times 10^{15}$   $\text{cm}^{-2}$ 로 주입된 경우 농도 분포에서 peak치 부근에서 전기적으로 활성화되지 못하고 인듐의 고체 고용도 보다 더 큰 값의 농도분포 영역은 precipitation을 나타내었다 [19,20].

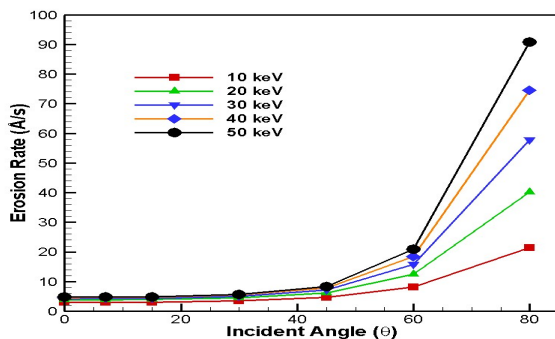


Fig. 1. Erosion rate from different incident angles and energies using indium implantation with a dose of  $1 \times 10^{14}$   $\text{cm}^{-2}$  in silicon.

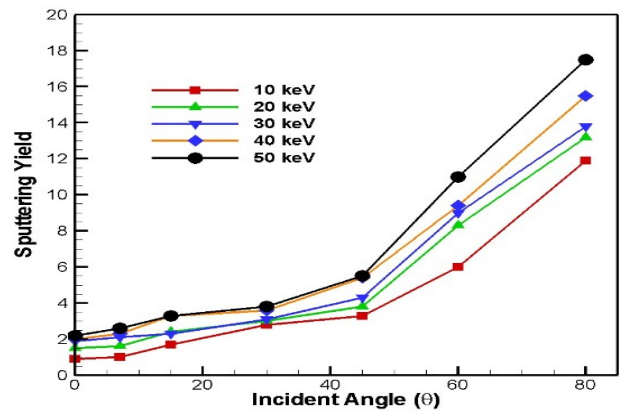


Fig. 2. Sputtering yield from different incident angles and energies using indium implantation with a dose of  $1 \times 10^{14}$   $\text{cm}^{-2}$  in silicon.

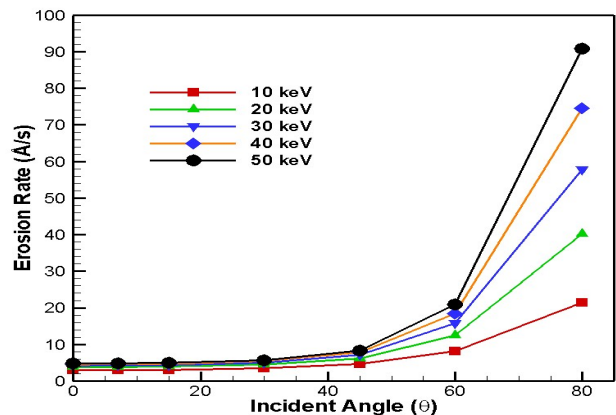


Fig. 3. Erosion rate from different incident angles and energies using indium implantation with a dose of  $1 \times 10^{15}$   $\text{cm}^{-2}$  in silicon.

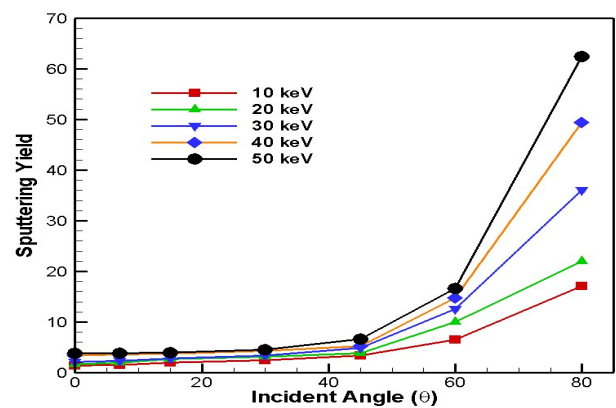


Fig. 4. Sputtering yield from different incident angles and energies using indium implantation with a dose of  $1 \times 10^{15}$   $\text{cm}^{-2}$  in silicon.

**2.1.1 T-dyn 시뮬레이션으로부터 인듐 이온 주입된 실리콘기판의 sputtering 특성 조사**

T-dyn simulation tool을 이용하여 dose에 따른 sputtering yield 및 erosion rate (Å/s)를 그림 1에서 4가지 각각 나타내었다. Sputtering 효과에 의한 표면 부식층 두께( $X_s$ )는 수식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_s = \frac{S}{N}\phi \tag{8}$$

여기서 S는 sputtering yield, N은 target의 density,  $\phi$ 는 dose를 나타낸다.  $X_s$ 가 일정한 경우 주입된 이온의 농도분포는 가우스 분포로 수식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C(x) = \frac{N}{2S} \left( \text{erf} \frac{x-R_p+X_s}{\sqrt{2}\Delta R_p} - \text{erf} \frac{x-R_p}{\sqrt{2}\Delta R_p} \right) \tag{9}$$

T-dyn simulation tool 을 이용하여 인듐 이온주입 입사각에 따른 erosion rate (Å/s) 및 sputtering yield 를 그림 1과 2에 각각 나타내었다. 30° 이상의 입사각에서는 sputtering yield가 큰 값으로 가파르게 증가하는 형태로 나타났고 80°에서는 가장 큰 값으로 나타내었다. sputtering yield는 기본 단위가 atoms/ion으로 표시되며 입사된 이온 당 sputtering된 기판 원자의 수를 즉 sputtering yield (Y)라고 한다. 여기서 사용된 수식은 수식 (10)에 나타내었다.

$$Y = (0.042 \times \alpha \times S_n(E)/U) \times \sqrt{1 - \left(\frac{E_{th}}{E}\right)^2} \tag{10}$$

여기서  $\alpha \times S_n(E)$ 는 sputtering에 대한 표면에서의 축적된 에너지를 나타내며, E는 이온 에너지,  $E_{th}$ 는 sputtering이 나타나는 임계 에너지, U는 sublimation 에너지를 각각 나타낸다. Disorder profile은 전체변위를 나타내며 수식은 수식 (11)에 나타내었다.

$$D(x) = N \times (1 - \exp(-P(x)/Y)) \tag{11}$$

여기서 N은 기판의 원자 밀도, Y는 sputtering yield, P(x)는 damage(x)의 적분을 나타내며, 이온빔에 의해서 x와 x+vt 사이에서 eroded thickness, 즉 부식된 층이 vt에 해당된다.

그림 3과 4는 다소 더 높은 dose인  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 로 실리콘에 인듐 이온 주입한 경우 입사 각도에 따른 erosion rate (Å/s) 및 sputtering yield를 각각 나타내고 있다.

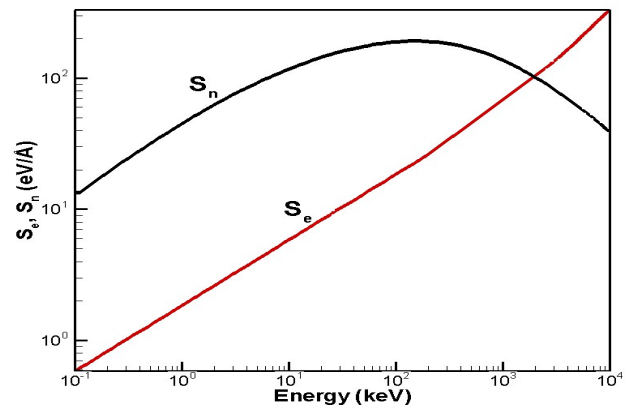
**2.1.2 SRIM과 UT-Marlowe로부터 입사각도 및 에너지에 따른 컴퓨터 시뮬레이션 결과**

실리콘에 인듐이온 주입에서 직접적으로 range 분포에 작용하는 전자 정지력( $S_e$ )과 핵정지력( $S_n$ )을 0.1 keV에서 10 MeV의 에너지영역에 대해서 그림 5에 나타내었다.

그림 5에서 핵정지력은 150 keV에서 최대치인 191.2 eV/Å를 나타내어 sputtering이 최대로 일어나는 에너지로 판단할 수가 있는 반면에 전자 정지력( $S_e$ )은 1 eV에서 10 MeV까지  $\sqrt{E}$ 에 비례하여 꾸준히 증가하는 전자 정지력을 나타내고 있다. 300 keV 이상의 에너지 영역에서 핵정지력은 점차적으로 감소함을 나타내고 있다.

다양한 입사 각도에 따른 range 분포를 그림 6에 나타내었다. 입사 각도가 0°에서 7°의 범위와 10 keV에서 50 keV의 에너지영역에서는 채널링 프로파일을 나타내는 UT-Marlowe의 데이터는 비정질기판에 적용되는 가파르게 떨어지는 분포를 나타내는 SRIM 시뮬레이션결과보다 더 큰  $R_p$ 의 값을 나타내었다.

그림 7은 UT-Marlowe와 SRIM의 시뮬레이션 결과로부터  $\Delta R_p$  data를 나타내고 있다. 그림 6과는 달리 UT-Marlowe의 데이터는 전 구간의 각도 범위에서 더 크고 45°에서 가장 큰 값을 나타내고 있다.



**Fig. 5.** Electron and nuclear stopping power from different energies in silicon.

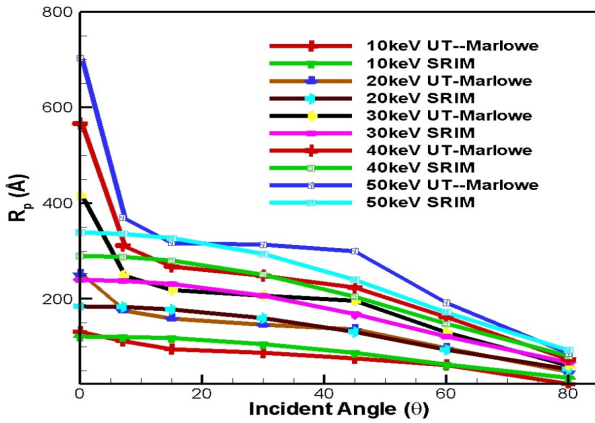


Fig. 6.  $R_p$  data from UT-Marlowe and SRIM simulations.

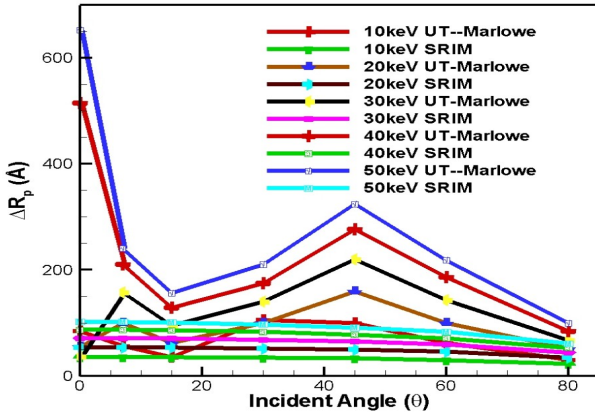


Fig. 7.  $\Delta R_p$  data from UT-Marlowe and SRIM simulations.

따라서 입사 각도가 점차적으로 커짐에 따라서 range는 작아져야 되는데 UT-Marlowe의 데이터는 20°에서 60°의 입사각 범위에서 다소 더 증가하는 결과를 나타내어서 실제로 예상되는 range의 SRIM 데이터와 비교하여 모순되는 결과를 나타내기에 사용 가능한 입사각의 범위는 0°에서 20°의 범위로 제한할 수가 있다고 판단된다.

**2.1.3 실리콘기판에 이온 주입된 인듐 이온의 농도 분포**

에너지 영역 10 keV에서 50 keV의 범위로 인듐을 실리콘에 이온 주입된 인듐의 프로파일을 서로 다른 깊이 때문에 그림 8과 9에 각각 나타내었다. 그림에 나타난 것처럼 비정질기판에 인듐이 주입된 분포는 가우스

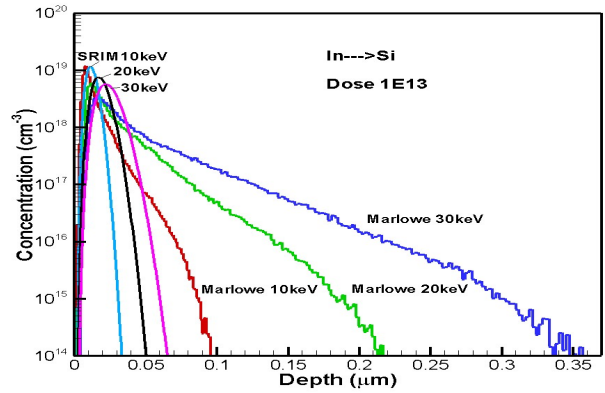


Fig. 8. Indium profiles in implanted silicon from UT-Marlowe and SRIM simulations between 10 keV to 30 keV.

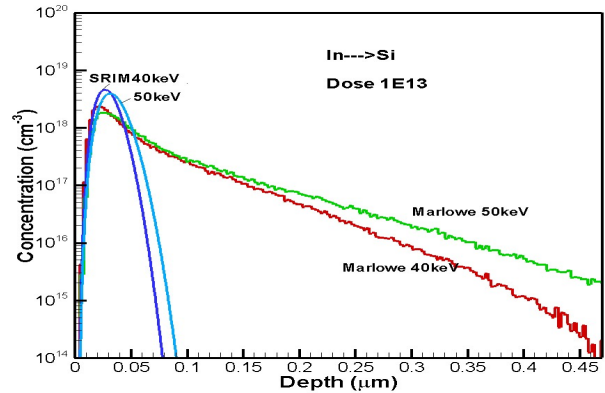


Fig. 9. Indium profiles in implanted silicon from UT-Marlowe and SRIM simulations using energy 40 keV and 50 keV.

분포와 비슷한 형태로 나타나는 반면에 단결정기판에 이온 주입된 인듐의 분포는 완만하고 더 깊은 channeling tail이 나타남을 확인할 수가 있다.

실리콘에 인듐이 이온 주입된 SRIM 시뮬레이션 결과인 3D (three-dimensional) 분포는 그림 10에서 그림 13까지 나타내었다. 수직 방향의 깊이는 100 nm 이고 측면의 폭은 50 nm를 나타내고 있다. 입사 이온 빔의 각도가 더 커짐에 따라서 농도분포는 측면방향으로 더 기울어짐을 확인하였다.

질소 분위기의 1,000°C에서 열처리 후에 나타나는 도핑 분포는 그림 14와 15에 각각 나타내었다. 프로파일 tail 부분을 묘사하는  $\gamma$  (skewness) 및  $\beta$  (kurtosis)를 제외한 수식 (3)을 적용함으로써 실험 data와 잘 일치하는 분포를 나타내었다.

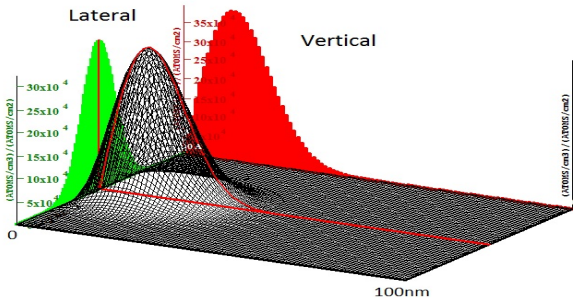


Fig. 10. Indium profiles in implanted silicon under condition of energy 10 keV at 0° tilt.

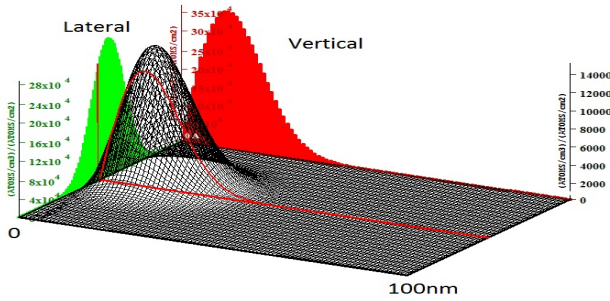


Fig. 11. Indium profiles in implanted silicon under condition of energy 10 keV at 30° tilt.

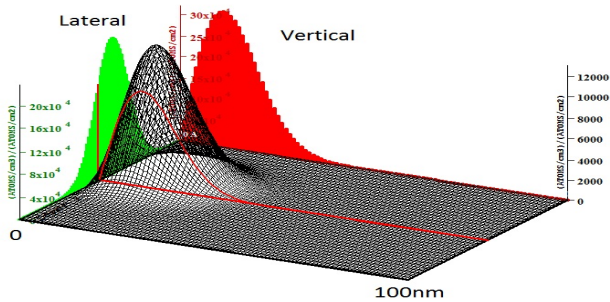


Fig. 12. Indium profiles in implanted silicon under condition of energy 10 keV at 45° tilt.

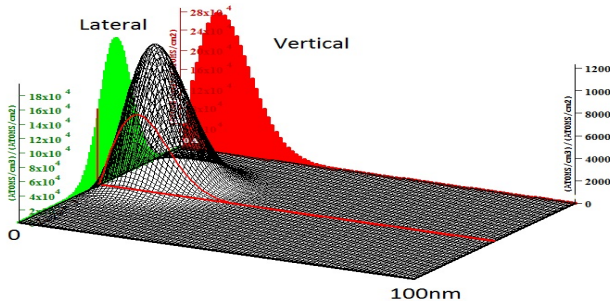


Fig. 13. Indium profiles in implanted silicon under condition of energy 10 keV at 60° tilt.

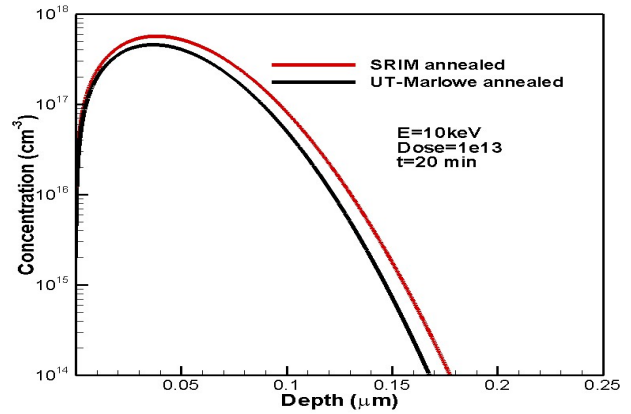


Fig. 14. Indium diffused profiles in implanted silicon under condition of energy 10 keV at 0° incident.

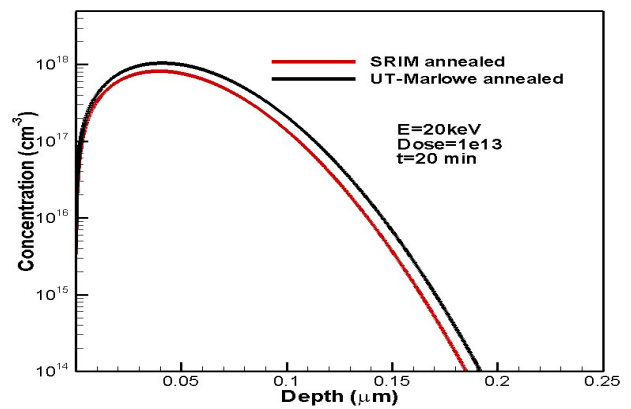


Fig. 15. Indium diffused profiles in implanted silicon under condition of energy 20 keV at 0° incident.

이때 실리콘에서 인듐의 확산계수는 수식 (2)에 의해서 열처리 온도 1,000°C에서 20분간 열처리한 경우에  $5.907 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 값을 나타내었다.

그림 14에서 10 keV의 경우에 각각의 peak 농도는  $0.0362 \mu\text{m}$ 에서  $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 와  $5.62 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 를 나타내었다. 그림 15에서 20 keV의 경우에 각각의 peak 농도는 10 keV의 경우보다 다소 더 깊은 분포를 나타내었다. 실리콘에서 깊이가  $0.041 \mu\text{m}$ 에서  $8.13 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 과  $1.04 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 를 나타내었다.

그림 14와 15에서 SRIM이 UT-Marlowe보다 다소 더 큰 값의 농도분포를 나타낸 이유는 에너지가 증가함에 따라서 UT-marlowe의  $R_p$ 의 값이 다소 더 크고 피크농도를 중심으로 더 sharp한 형태를 나타내기에도 평 분포가 그림 14와 15처럼 나타나게 된다. 지금까지

지도 30 keV 이하의 낮은 에너지로 실리콘에 이온 주입된 인듐의 열처리 후에 나타나는 도핑분포는 아직까지 실험 데이터가 잘 알려지지 않고 50 keV에서 수백 keV의 에너지 영역에서의 SIMS 데이터는 부분적으로 발표된 실정이다 [18-20]. 그러나 낮은 에너지에서는 인듐이 heavy ion이기 때문에 실리콘에서 sputtering 효과가 나타난다. 이러한 sputtering 효과를 본 연구에서는 dose에 따라서 그림 1에서 그림 4에 자세히 나타내었다. 180 keV의 에너지로 실리콘에 이온주입된 인듐의 분포와 1,100°C에서 20분간 열처리한 경우 확산된 인듐의 농도분포를 그림 16에 나타내었다. UT-Marlowe의 분포는 에너지가 150 keV 이하의 영역에서만 유효하기에 그림 16에서 나타내지 않았다. SRIM의 시뮬레이션에서  $R_p$ 와  $\Delta R_p$ 는 91.2 nm와 27.5 nm를 각각 나타내었다. 이 데이터를 수식 (3)에 적용한 결과를 그림 15에서 SRIM annealed data로 표시하였다. 1,100°C에서 20분간 질소 분위기에서 열처리한 경우 인듐의 확산계수는  $7.88 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 값을 나타내었다. 이온 주입한 경우 최대농도 부근에서는 실험결과와 시뮬레이션의 결과가 대체로 잘 일치함을 확인할 수가 있다. 그러나 열처리한 경우는 확산된 SIMS data가 다소 더 깊은 농도 분포를 나타내고 있다.

그림 14는 열처리한 후에 일차원적인 인듐의 분포를 나타내고 있는 반면에 수식 (1)에서 (7)을 적용하여 격자를 형성하고 mesh 형성 및 천이 시간에 따른 확산 방정식의 적용을 통한 확산된 2차원의 해석적인 분포를  $C^{++}$  프로그램으로 작성하여 그 결과를 그림 17에 나타내었다. 그림 17은 에너지 10 keV, 이온주입량  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 로 인듐이온을 실리콘에 이온주입한 후에 전기적인 활성화를 위해서 1,000°C에서 20분간 열처리 후에 나타낸 도핑 분포를 나타내었다. 확산 후에 변화는  $R_p$ 는 0.0122  $\mu\text{m}$ 에서 0.0131  $\mu\text{m}$ 로 나타났으며,  $\Delta R_L$ 은 31 Å에서 33.3 Å을 나타내어 7.4%가 증가하였음을 나타내었다. 본 연구 데이터는 CMOS의 halo 및 pocket 이온주입, 매우 얇은 채널형성 및 접합구조에 적용되리라고 사료된다. 10 keV에서 50 keV 에너지로 입사각도가 0°, 즉 수직 방향으로 입사된 이온빔의 평균주행깊이는 122 Å에서 339 Å을 나타내었다. 2D 분포를 나타내기 위해서 측면방향의 분포를 표 1에 나타내었다. 표 1은 10 keV에서 50 keV의 낮은 에너지로 인듐 이온을 실리콘에 0°에서 80°로 입사각을 변화하여 이온 주입하였을 때 측면분포를 나타내는 range 변수, 즉  $\Delta R_L$ 의 시뮬레이션의 값을 Å의 단위로 나타내었다.

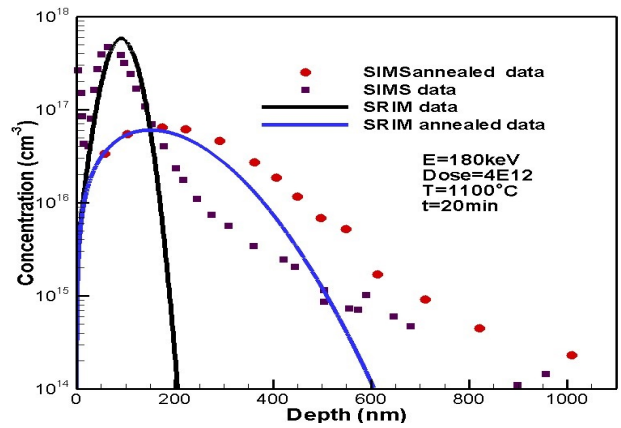


Fig. 16. Comparison between Indium diffused profiles in implanted silicon.

Table 1.  $\Delta R_L$  data obtained from the SRIM simulation data for 10~50 keV In implantation with different incident angles in silicon.

Angle	0°	7°	15°	30°	45°	60°	80°
keV	$\Delta R_L$ (Å)						
10	31	34	45	70	93	112	126
20	45	51	67	105	141	169	191
30	58	65	86	135	182	220	247
40	69	78	103	164	221	266	300
50	79	90	120	191	257	310	349

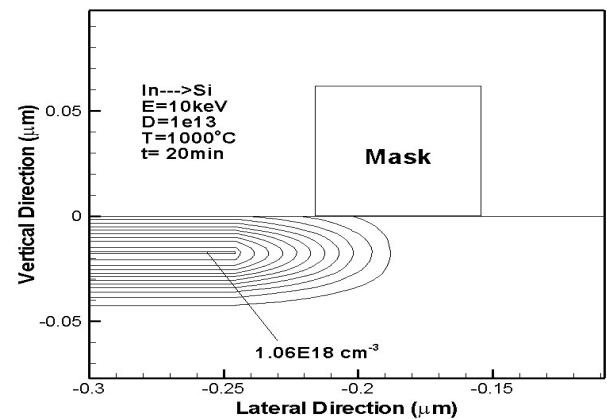


Fig. 17. Simulation result of two-dimensional indium distribution in silicon.

수직 입사로 0°의 이온빔 주입한 경우에 31 Å에서 79 Å의 측면 분포를 나타내었다. 그러나 입사 각도가

80°로 커짐에 따라서 수직 방향보다 약 5배의 더 큰 값을 나타내어 인듐이온의 분포가 측면 방향으로 더 깊이 침투함을 확인할 수 있었다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 16에서 나타난 결과로부터 SIMS data는 SRIM 시뮬레이션결과와 대체로 잘 일치하는 농도분포를 나타내었고 확산된 농도분포는 최대 농도 값 부근에서는 잘 일치함을 나타내었으나, 열처리 후에는 다소 더 깊이 침투하는 분포를 나타내었다. 본 연구에서는 실리콘기판에 인듐이온 주입 후에 열처리하여 이차원적인 농도분포를 그림 17에 처음으로 나타내었다. 그림 8과 9는 이온 주입 후에 열처리 전에 농도분포를 나타내었고, 그림 14에서 16은 확산된 일차원의 농도분포를 나타내었다. 다양한 입사각에 따라서 인듐이온의 수직 방향의 평균주행거리 및 표준편차를 그림 6과 7에 각각 나타내었다.

### 4. 결론

실리콘에 인듐이온 주입 논문은 CMOS 제작공정에서 halo 및 pocket 이온 주입으로 실제로 사용되고 외국에서는 이미 실험적으로 발표된 논문들이 많은데 비해서, 국내에서는 발표된 논문을 찾기가 어려운 실정이다. 실리콘기판에 인듐이온의 주입에서 주입량 및 입사된 빔의 각도에 따른 표면에서의 sputtering 효과와 erosion rate를 컴퓨터 시뮬레이션결과로부터 자세히 나타내었다. 낮은 이온 주입량에서 인듐이온의 일차원적인 농도 분포는 몬테카를로 프로그램인 UT-Marlowe와 SRIM을 이용하여 실리콘의 단결정 및 비정질구조에서 인듐이온의 분포에 대한 물리적인 특성을 비교하였고 특히 낮은 도즈의 이온 주입에서 실리콘 단결정기판에서는 channeling tail을 나타내는 도핑 분포를 나타내었다. 또한 이온 주입된 농도분포를 3차원으로 수직 및 측면 방향으로 나타내었고 입사이온빔의 각도가 더 커짐에 따라서 측면 방향으로 더 접근되고 기울어지는 분포를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 20 keV 이하의 낮은 에너지에서 인듐이온의 농도분포에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다. 또한 본 연구에서 실리콘에서 인듐의 확산계수가 1,100°C에서 20분간 질소 분위기에서 열처리한 경우 인듐의 확산계수는  $7.88 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$ 이고

1,000°C에서 20분간 열처리한 경우는  $5.907 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 값을 각각 나타내어서 SIMS data와 잘 일치함을 확인하였다. 실리콘에 10 keV로 인듐이온 주입된 결과로부터 수직 방향으로 12.2 nm, 수평 방향으로 3.1 nm의 이온 분포를 각각 나타내어서 현재 반도체 소자제작사에서 30~20 nm 공정기술에서 보다 더 향상된 10 nm의 공정 기술에 적용될 수 있다고 사료된다. 실제적으로 일차원 및 이차원적인 확산 모델을 본 연구에서 독자적인 계산 및 해석한 결과들을 기술하였고 또한 SIMS 실험 데이터와도 비교 분석하여 본 논문의 실험적인 검증 및 정확성을 본 연구에서 제시하였다. 이러한 해석적인 방법을 통하여 1D 및 2D의 분포를 정확하게 나타내어서 전기적인 특성연구에 실제로 적용되리라고 사료된다.

### REFERENCES

- [1] T. Noda, *J. of Appl. Phys.*, **93**, 1428 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1534629>]
- [2] S. Scalese, M. Italia, A. La Magna, G. Mannino, V. Privitera, and P. Pichler, *J. Appl. Phys.*, **93**, 9773 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1572547>]
- [3] P. Chena, Z. Anb, M. Zhua, R.K.Y. Fua, and P. K. Chua, *Mat. Sci. Eng.*, **B 114**, 251 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2004.07.031>]
- [4] J. F. Ziegler, *Nucl. Inst. Phys. Res.*, **B6**, 270 (1985). [DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(85\)90645-7](https://doi.org/10.1016/0168-583X(85)90645-7)]
- [5] J. P. Biersack, *Nucl. Inst. Phys. Res.*, **B35**, 205 (1988). [DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(88\)90272-8](https://doi.org/10.1016/0168-583X(88)90272-8)]
- [6] J. P. Biersack, *Nucl. Inst. Meth.*, **B18**, 344, (1987).
- [7] S. J. Morris, B. Obradovic, S. H. Yang, and A. F. Tasch, *IEDM Tech. Digest* (1996) p. 721.
- [8] C. Park, K. M. Klein, and A. F. Tasch, *Soild State Electronics*, **33**, 645 (1990). [DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(90\)90176-F](https://doi.org/10.1016/0038-1101(90)90176-F)]
- [9] B. E. Kareh, *Fundamentals of Semiconductor Processing Technology* (Kluwer Academic Publishers, USA, 1995) p. 352. [DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2209-6>]
- [10] J. D. Plummer, M. D. Deal, and P. B. Griffin, *Silicon VLSI Technology* (Prentice Hall, Inc., USA, 2000) p. 451.
- [11] H. Ryssel, J. Lorenz, and W. Kreuger, *Nucl. Inst. Phys. Res.*, **B19**, 45 (1987). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(87\)80012-5](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(87)80012-5)]
- [12] H. Hofsässa, K. Zhanga, and A. Mutzke, *Appl. Surf. Sci.*, **310**, 134 (2014).
- [13] W. Möller, W. Eckstein, and J. P. Biersack, *Comp. Phys.*

- Commun.*, **51**, 355 (1988).
- [14] W. Möller and W. Eckstein, *Nucl. Inst. Meth.*, **B2**, 814 (1984).
- [15] W. Eckstein, *Computer Simulation of Ion-Solid Interactions* (Springer, Berlin, 1991). [DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-73513-4>]
- [16] A. Bartel, J. Lorenz, and H. Ryssel, *Nucl. Inst. Phys. Res.*, **B6**, 121 (1988).
- [17] H. Ryssel, J. Lorenz, and W. Kreuger, *J. Appl. Phys.*, **A41**, 201 (1986). [DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00616841>]
- [18] G. F. Cerofolini, G. Ferla, G. U. Pignatelli, and F. Riva, *Thin Solid Films*, **101**, 273 (1983).
- [19] S. Gennaro, M. Barozzi, M. Bersani, B. J. Sealy, and R. Gwilliam, *Nucl. Inst. Phys. Res.*, **B237**, 88 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.04.083>]
- [20] K. Suzuki, H. Tashiro, and T. Aoyama, *Sol. State Elec.*, **43**, 27 (1999). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(98\)00251-2](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(98)00251-2)]