

## 실리콘에 고에너지 안티몬이온주입의 실험과 개선된 모델에 관한 연구

### A Study of Experiment and Developed Model by Antimony High Energy Implantation in Silicon

정원채<sup>1,a</sup>  
(Won-Chae Jung<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

Antimony profiles by MeV implantation are measured by secondary ion mass spectrometry (SIMS) and spreading resistance (SR). The moments of SIMS and simulated profiles are calculated and compared for the exact range in MeV energy. SRIM, DUPEX, ICECREM, and TSUPREM4 simulation programs are used for the calculation of range 1D, 2D. SRIM is a Monte Carlo simulation program and different inter-atomic potentials can be used for the calculation of nuclear stopping power cross-section ( $S_n$ ) and range moments. Nevertheless, the range parameters were not influenced from nuclear stopping power in MeV. Through the modification of electronic stopping power cross-section ( $S_e$ ), the results of simulation are remarkably improved and matched very well with SIMS data. The values of electronic stopping power are optimized for Sb high energy implantation. For the electrical activation, Sb implanted samples are annealed under  $N_2$  and  $O_2$  ambient. Finally, Oxidation retard diffusion(ORD) effect of Sb implanted sample are demonstrated by SR measurements and ICECREM simulation.

**Key Words** : MeV implantation, SIMS, SR, Modification of stopping power, Simulation

#### 1. 서론

BiCMOS(Bipolar Complementary Metal Oxide Semiconductor), CMOS 반도체 집적회로에서 매텀층과 도핑을 위해서 안티몬의 이온주입공정기술이 소자제작사들에서 적용되어 왔다[1-6]. 주로 안티몬이온의 이온주입실험은 상대적으로 낮은 300 keV의 에너지 영역에서 주로 실험이 수행되었다[7, 8]. 또한 붕소(boron)와 인(phosphorus)의 MeV 이온주입실험과 컴퓨터모의공정실험은 많이 수행되어진[9-11] 반면에 안티몬의 고에너지 이온주입실험은 거의 수행되어지고 있지 않은 실정이고 이에 대한 발표논문도 거의 찾아 보기가 어려운 실정이다. 따라서 이에 대한 실험에 다양한 연구를 하여야 할 필요성이 있다. 본 연구에서는 Genus Ionex사의 MeV 이온주입장치를 이용하여 MeV의 에너지영역에서 실리콘기판에 이온주입을 하였고 Camca4 SIMS 장치로 안티몬의 농도분포 실험데이터를 얻었을 수 있었다. 이온주입된 안티몬의 농도분포는 DUPEX[12], TSUPREM4[13], ICECREM[14, 15] TRIM[16,17] 과 SRIM[18,19]의 컴퓨터모의실험을 통해서 얻어진 결과를 서로 비교하였고 1D에서 얻어진 데이터를 2D의 프로파일로 나타내었다. 또한 최적화 된 컴퓨터모의실험을 위해서 전자정지력을 수정하여 실험데이터와 잘 일치하는 분석적인 방법을 본 논문에서 제시하였다. 다양한 원자상호간의 전위모델들[20,21]을 적용하여 핵정지력과 사정거리(range)를 서로 비교하였다. 전기적인

1. 경기대학교 전자공학과

(경기도 수원시 영통구 이의동 산 94-6)

a. Corresponding Author : wchung@kyonggi.ac.kr

접수일자 : 2004. 7. 2

1차 심사 : 2004. 8. 20

2차 심사 : 2004. 10. 11

심사완료 : 2004. 10. 20

활성화를 위해서 열처리후에 측정된 안티몬의 농도분포는 SR(Spreading Resistance)로 측정된 안티몬의 농도분포는 ICECREM 컴퓨터 모의실험결과와 비교분석하였다. 안티몬이온은 산소분위기 열처리에서 ORD(Oxidation Retard Diffusion)효과를 확인할 수가 있었다. 또한 분석적인 방법을 통하여 안티몬의 프로파일에 대한 모멘트(moment)를 최적화 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 안티몬의 이온주입과 열처리 및 측정

안티몬을 고에너지 MeV의 에너지영역에서 비저항( $\rho$ )는 4~5  $\Omega \cdot \text{cm}$ 을 가지는 p형의 실리콘 기판에 이온주입 하였다. 이온주입시 채널링(channeling)효과를 억제하기위해서 7°의 각으로 beam line이 기울어지게 하여 실험을 수행하였다. Genus Ionex 이온주입 장치는 독자적으로 제작된 proto type 으로 2.0 MV 까지의 가속전압을 얻을 수 있는 tandem 장비이고 안티몬이온 발취전압(extraction voltage)은 20 kV로 가속된다. 그 다음 40 kV의 사전가속전압으로 이온들은 가속된다. 질량분리를 위한 마그네틱의 전류에 대한 다양한 전하상태(charge state) 관계를 그림1에 나타내었고 첫 번째 마그네틱에서 26 A~28 A의 마그네틱전류에서 분리되어 2차이온인 부전하를 띤 안티몬이온이 생성된다. 이 이온은 인력의 원리로 계속 가속되어 power supply의 중간에서 불활성기체인 질소가스와 충돌하여 양전하로 바뀌어서 척력이 작용하여 다시 한번 더 가속된다. 이 이온은 두 번째 마그네틱에서 다양한 양전하상태의 이온들로 분해 되어진 후에 마지막 장소(end station)에서 놓여있는 실리콘기판 속으로 이온주입 되어진다. 이때에 큰 원판형태의 디스크 위에 10장의 실리콘웨이퍼가 놓여진다. 이 디스크는 두개의 엘리베이터(elevator) A와 B 타입의 웨이퍼엘리베이터로부터 로봇팔을 이용하여 디스크로 놓여지게 된다. 이때에 디스크는 웨이퍼를 디스크에 놓이기 위한 spin position, 회전(rotation), scanning motion의 세 가지 형태의 움직임을 나타낸다. 디스크의 틈새로 유입된 이온빔은 faraday cup에서 측정되어 정확한 이온주입량인 도즈(dose)를 측정하게 된다. 안티몬이온의 농도분포를 측정하기 위해서 Cameca4f의 SIMS장비가 사용되었다. 이때에 일차이온으로써 세슘이온( $\text{Cs}^+$ )이 5 kV의 가속전압으로 안티몬이 주입된 샘플로 60  $\mu\text{m}$ 의 지름의

단면적으로 가속되었다. Dektak-profilometer를 사용하여 crater의 깊이를 측정하였다. 일반적으로 알은 접합에너지(shallow junction energy)로 이온주입된 시료의 SIMS측정에서는 일차가속에너지를 아주 낮게 측정해야 된다. 소위 SIMS 측정시 되튀겨들어감(knock on) 효과에 의해서 프로파일의 꼬리(tail) 부분은 더 깊은 분포를 나타내게 된다. 본 실험에서는 매우 높은 MeV의 고에너지 이온주입 실험인 관계로 knock on 효과를 거의 무시할 수 있다. 그림 1은 고에너지 마그네틱에서 +1가 부터 +6가 까지 이온주입할 수 있는 안티몬이온의 전하상태를 나타내고 있다. 따라서 터미널전압이 2 MV인 경우 전하상태가 +6가일때에 60 kV의 사전가속에너지에  $(n+1) \times V_T$  더하면 전체이온주입에너지는 14.06 MeV가 된다.

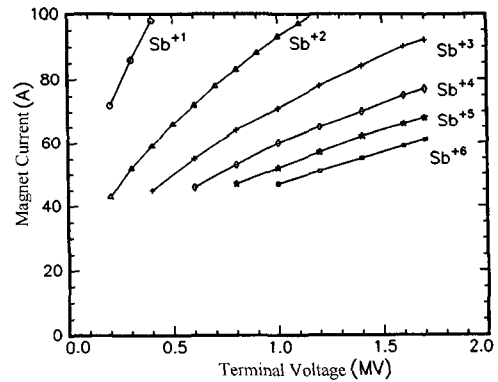


그림 1. 터미널전압에 대한 마그네틱전류에서 안티몬이온의 다양한 전하상태.

Fig. 1. Various charge state of antimony ions from terminal voltage and magnet current.

주입된 안티몬의 전기적인 활성화를 위해서 1000 °C의 온도에서 30분간 열처리 하였다. 가스분위기를 질소와 산소의 분위기에서 열처리하여 SR (spreading resistance)방법으로 전기적으로 활성화된 안티몬이온의 농도분포를 측정하였다. 열처리에 따른 안티몬이온의 거동을 질소와 산소분위기에서 열처리해본 결과 산소분위기에서 열처리한 경우는 ORD (Oxidation Retard Diffusion)효과가 나타남을 확인할 수가 있었다. 본 실험에서 사용한 산화방법은 습식산화방법으로 1000 °C의 온도에서 30분간 열처리후에 산화막의 두께는 0.255  $\mu\text{m}$ 를 나타내었다.

2.2 실험데이터와 컴퓨터모의실험결과의 분석

그림2는 이중피어슨(dual pearson)함수를 이용하여 SIMS 데이터와 완벽하게 일치시킨 일차원적인 그림을 나타내고 있다. 이러한 이중피어슨(dual pearson)함수를 사용한 경우는 dupex 프로그램을 이용하여 각각 4개의 프로파일 모멘트와 각 이온 주입 도즈(dose)의 비를 사용하여 총 9개의 파라미터를 사용하여 그림 2에 나타내었다. 사용된 수식은 다음의 수식 (1)에 나타내었다.

$$C(x) = D_1 \cdot f_1(x) + D_2 \cdot f_2(x) \quad (1)$$

여기서  $f_1(x)$  와  $f_2(x)$ 는 random 영역과 channel 영역에서의 규격화된 pearson 함수들이다.  $D_1$  과  $D_2$  는 이 함수들에 해당하는 각각의 도즈(dose)에 해당한다. 전체 도즈  $D_T$  는 수식 (2)와 같다.

$$D_T = D_T \int_0^\infty \left[ \frac{D_1}{D_T} f_1(x) + \frac{D_2}{D_T} f_2(x) \right] dx \quad (2)$$

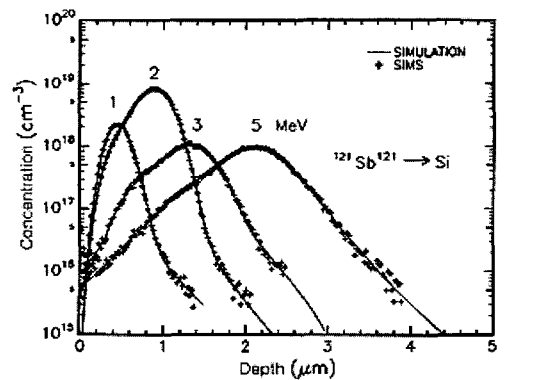


그림 2. 이중피어슨함수를 사용하여 나타낸 데이터와 SIMS 데이터의 비교.  
 Fig. 2. Comparison with SIMS and dual pearson simulation data.

그림 3은 1, 2, 3과 5 MeV의 에너지로 이온주입된 안티몬의 질소와 산소가스의 분위기에서 1000 °C에서 30분간 열처리 후에 측정된 spreading resistance profile (SRP)이다. 실선은 질소분위기에서 열처리한 경우이고 점선은 산소가스 분위기에서 열처리한 경우에 측정된 전기적으로 활성화된

안티몬이온의 농도분포를 나타내고 있다. 꼬리(tail)부분에서 산소가스 분위기에서 열처리한 경우의 점선들이 실선들보다 덜 확산된 표면방향으로 나타나 있다. 이러한 현상을 oxidation retard diffusion(ORD) 현상이라고 한다. 즉 안티몬의 확산은 산화동안에 더 느리게 확산한다. 산화공정에서 붕소, 인, 비소는 틸새(interstitial) 메카니즘으로 확산하는 oxidation enhanced diffusion (OED) 현상을 나타내는데 반해서 안티몬은 공공(vacancy)의 메카니즘으로써 중성결공인  $V_0$  와 음의 부호를 띄는 부결공인  $V^-$ 에 의해서주로 확산하게 된다. 산화공정에서 틸새들은 기관의 공공들과 재결합하게 되어 공공의 농도를 저하시킨다. 안티몬이온의 공공(vacancy) 메카니즘은 실리콘 격자에서 안티몬이온의 상대적인 크기(size) 때문이다. 점결합과 도판트원자들과의 상호작용은 크기에서 차이가 나타나기 때문에 큰 불순물 원자는 공공과 함께 움직인다. 반면에 작은 도판트 원자들은 오히려 틸새(interstitial)로써 움직인다. 즉 산화에서 점결합의 증가를 방해함으로써 확산효과를 늦추는 효과를 나타내게 된다. 질소분위기로 1000 °C에서 열처리한 경우 실리콘에서 안티몬의 확산계수는 다음의 수식에 의해서  $D = 3.94 \cdot \exp\left(-\frac{4.49 \times 10^4}{1273}\right)$ 의 수식을 계산하면  $1.89 \times 10^{-15}$  (cm<sup>2</sup>/sec) 이었다[6]. 또한 1000 °C에서 전기적으로 활성화된 고체용해도(solid solubility)는  $4 \times 10^{19}$  cm<sup>-3</sup> 이었다[6].

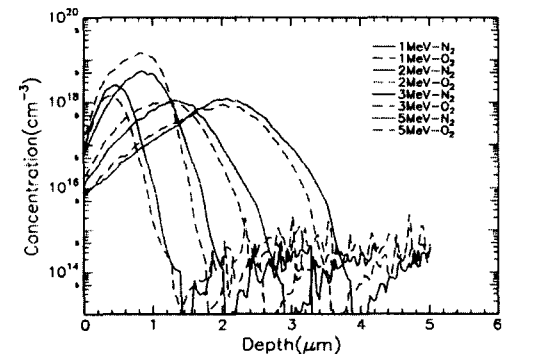


그림 3. 안티몬이온의 질소와 산소분위기에서 1000 °C의 온도에서 30분간 열처리후에 측정된 SRP.  
 Fig. 3. SRP data of antimony implanted profiles under N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> gas ambient at 1000 °C for 30 minutes.

ICECREM 프로그램을 이용하여 안티몬 이온주입 후에 1000 °C에서 30분 동안 질소와 습식산화 방법으로 산소가스 분위기에서 열처리후에 나타나는 컴퓨터모의실험 데이터와 SR 데이터를 표1에서 서로 비교하였다. 질소와 산소가스 분위기에서 열처리후에 p-n 접합깊이를 표 1에 나타내었다. 표1에서 나타내었듯이 측정된 SR과 ICECREM 데이터에서 나타나 있듯이 산소분위기에서 열처리한 경우가 불활성인 질소가스 분위기에서 열처리한 경우 보다 p-n 접합의 깊이가 항상 더 작은 값을 나타내었다. 이 이유는 안티몬은 ORD효과를 나타내기 때문이다.

표 1. 산소와 질소가스분위기에서 열처리후에 측정된 p-n 접합깊이 SR 데이터와 ICECREM의 비교.

Table 1. Comparisons between ICECREM and measured SR data of p-n junctions.

MeV	Dose (cm <sup>-2</sup> )	SR data of p-n junction (μm)		Simulation data of ICECREM	
		N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
1	7.5×10 <sup>13</sup>	1.425	1.387	1.136	1.022
2	4.3×10 <sup>14</sup>	2.166	1.794	1.722	1.612
3	8.3×10 <sup>13</sup>	2.909	2.61	2.545	2.426
5	1.0×10 <sup>14</sup>	3.881	3.577	3.687	3.570

SIMS 데이터를 ICECREM의 tool에 적용하여 1000 °C에서 열처리에 의해 전기적으로 활성화된 농도분포를 그림4에 나타내었다. ICECREM 프로그램에서 실리콘에서의 확산계수 D<sub>si</sub>는 다음의 수식 (3)으로 나타내어진다.

$$D_{si} = D_{a1} \cdot \frac{C_{vo}}{C_{vo}^*} + D_{a2} \cdot \frac{C_{io}}{C_{io}^*} \cdot \frac{I_{enh}}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

여기서 C<sub>vo</sub> 와 C<sub>io</sub> 는 중성을 띤 공공(vacancy)과 틸새(interstitial)의 농도를 나타낸다. C<sub>vo</sub><sup>\*</sup> 와 C<sub>io</sub><sup>\*</sup> 는 중성을 띤 공공(vacancy)과 틸새(interstitial)의 평형(equilibrium)값을 나타낸다. D<sub>av</sub> 와 D<sub>ai</sub> 는 공공과 틸새의 확산계수를 각각 나타낸다. 이온주입으로 유도된 확산증가는 I<sub>enh</sub> 로 나타내어지고 τ 는 이온주입으로 유도된 확산증가에 대한 감쇠시간을 나타낸다. 1000 °C의 산소가스 열처리에서 D<sub>ox</sub> = 5.19 × 10<sup>-3</sup> · exp(- $\frac{3.88}{(8.614 \times 10^{-5} \cdot 1273)}$ )의 수식에 의해서 안티몬의 확산계수 D<sub>ox</sub>의 값은 2.23×10<sup>-18</sup>

(cm<sup>2</sup>/sec) 이었다[6]. 따라서 산화분위기에서의 안티몬의 확산속도는 실리콘에서보다 느리게 확산함을 알 수 있다. ICECREM 시뮬레이션 결과인 그림4는 산소와 질소가스분위기에서 열처리 후에 전기적으로 활성화된 안티몬 이온의 분포를 나타내고 있고 특히 ORD효과가 나타남을 실제로 spreading resistance (SR)로 측정된 그림3의 측정데이터와 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

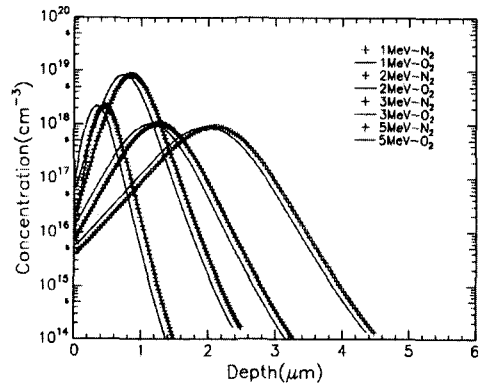


그림 4. 안티몬이온의 질소와 산소분위기에서1000 °C의 온도에서 30분간 열처리한 ICECREM 컴퓨터모의실험결과.

Fig. 4. Results of ICECREM simulation underN<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> gas ambient at 1000 °C for 30 minutes.

### 2.3 전자 및 핵정지력의 수정을 통한 개선된 안티몬이온의 사정거리

안티몬 이온주입된 SIMS 농도분포는 TRIM 프로그램의 결과와 1~4 MeV의 에너지 영역에서는 대체로 잘 일치하고 있다. 그러나 5 MeV 부터는 큰 편차를 나타내고 있다. MeV의 고에너지 영역에서는 전자정지력(N · S<sub>e</sub>)이 핵정지력(N · S<sub>n</sub>) 보다 더 지배적이다. 여기서 N는 원자밀도를, S<sub>e</sub> 및 S<sub>n</sub> 는 전자 및 핵 정지단면적(stopping cross-section)을 의미한다. 따라서 전자정지단면적을 수정하여 안티몬이온의 농도분포가 실험데이터와 잘 일치하도록 MeV의 에너지영역에서 사정거리(range)를 최적화 하였다. 핵정지력에 직접적으로 영향을 미치는 원자들 간의 전위모델인 Moliere, C-Kr 와 ZBL 전위들을[20,21] 다음의 수식 (4), (5)에 각각 나타내었다. 상호작용전위모델은 이온과 타겟의 외각전자들에 의한 차폐된 쿨롱전위 (screened Coulomb potential)의 수식으로 다음과 같이 수식 (4)

과 (5)로써 나타내어진다. 상호작용전위모델은 이온과 타겟의 외각전자들에 의한 차폐된 쿨롱전위 (screened Coulomb potential) 의 수식으로 다음과 같이 수식 (4)과 (5)로써 나타내어진다.

$$V(r) = \frac{Z_1 Z_2 \phi(r/a)}{r} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{a(r/a)} \Phi(r/a) = \frac{C}{r/a} \Phi(r/a) \quad (4)$$

$$\Phi(r/a) = \sum_{i=1}^n C_i \exp(-d_i r/a), \sum_{i=1}^n C_i = \Phi(0) = 1 \quad (5)$$

$Z_1, Z_2$  는 입사이온, 타겟의 원자번호를 나타낸다.  $r$ 은 반경거리,  $a$ 는 차폐길이(screening length)를 나타낸다. 차폐길이  $a$ 는  $a = 0.0853 a_B Z_{12}^{-1/2}$ 의 수식으로 나타내어진다. 여기서  $a_B$ 는 Bohr의 반경 ( $0.529 \times 10^{-8}$  Å)를 나타내며, 유효전하인  $Z_{12}$ 는  $Z_{12} = (Z_1^x + Z_2^y)$ 의 수식으로 나타내어진다. ZBL과 Kr-C 모델의 경우  $x=0.23$ 이고,  $y=1.0$ 의 값을 나타내었다. 반면에 Moliere는  $x=0.5$  이고  $y=0.67$ 의 값을 나타내었다. 이러한 3가지모델들의 차폐전위를 위한 수식은 수식(5)의 서로 다른 상수로써 나타내어진다. 이러한 상수값을 표 2에 나타내었다. 이러한 세가지 전위모델들을 적용하여  $R_p$ 와  $\Delta R_p$ 를 계산하여 본 결과  $R_p$ 는 아주 미세한 차이가 있었으나  $\Delta R_p$ 는 거의 변화가 없었다. 결론적으로  $R_p$ 와  $\Delta R_p$ 는 서로 다른 전위모델을 적용한 경우에  $R_p$ 와  $\Delta R_p$ 는 별차이가 없음을 그림 5에서 확인할 수 있었다. 또한 MeV 에너지 영역에서는  $(r/a)$ 가 1보다 작아짐으로 여러 가지 전위모델들에 따른 차폐효과가 거의 비슷한 결과를 나타내고 있다. 그러나 100 keV 이하의 에너지 영역에서는 다양한 전위모델에 따른 차폐효과가 매우 크게 나타남을 확인할 수 있다[20,21].

표 2. 세가지 전위에 대한 차폐함수의 상수.

Table 2. Constants in the screening functions for three types potentials.

모델 상수	Moliere	Kr-C	ZBL
$n$	3	3	4
$c_1$	0.35	0.190945	0.02817
$c_2$	0.55	0.473674	0.28022
$c_3$	0.10	0.335381	0.50986
$c_4$	0	0	0.18175
$d_1$	0.3	0.278544	0.20162
$d_2$	1.2	0.637174	0.40290
$d_3$	6.0	1.919249	0.94229
$d_4$	0	0	3.1998

그림 5는 세가지의 서로 다른 원자간의 전위모델에 따른  $R_p$ 와  $\Delta R_p$ 를 계산하였고, SIMS 데이터와 서로 비교하여 그림으로 나타내었다. 본 연구에 적용한 세 가지의 전위모델들은 이온과 기관원자들과의 충돌시 산란각(scattering angle)에 영향을 주게 된다. 이 산란각은 핵정지력에 영향을 주어  $R_p$ 와  $\Delta R_p$ 를 결정하게 된다[17-20]. Moliere와 Kr-C 전위모델들이 SRIM과 TRIM프로그램에서 적용된 ZBL(Ziegler, Biersack, Littmark) 전위모델보다도  $R_p$ 의 값이 경미한 차로 다소 더 크게 나타나고 있음을 확인할 수가 있다. 반면에 이러한 세가지 전위모델을 적용한 경우에  $\Delta R_p$  값들은 거의 차이가 나지 않음을 그림 5에서 확인 하였다.

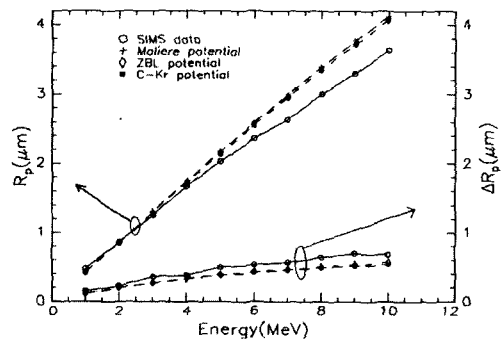


그림 5. 세 가지의 서로 다른 상호작용전위를 적용하여 계산된 사정거리와 SIMS 데이터의 비교.

Fig. 5. Comparison between SIMS data and calculated range from three different interaction potentials.

따라서 본 연구에서는 분석적인 방법으로써, 전자정지력을 수정하여 MeV로 이온 주입된 안티몬 이온의 사정거리와 농도분포를 개선시켰고 더 개선된 전자정지력을 구할 수 있었다. 에너지 1~10 MeV 영역에서 안티몬의 전자정지력을 위한 개선된 수식은 수식 (6)과 같다.

$$S_e (eV/\text{\AA}) = 1.9 \cdot E^{0.5} + 0.015 \cdot E \quad (6)$$

여기서 에너지 E는 keV에 해당한다. 일반적인 300 keV 이하의 에너지영역에서는 수식 (6)에서 나타낸 것처럼 앞의 항인 에너지에 대한  $S_e$ 의 관

계가  $\sqrt{E}$ 에 비례하는 수식으로 나타남을 알 수 있다. 그러나 MeV의 에너지 이온주입에서는 뒷부분의 항이 추가로 나타남을 수식 (6)를 통하여 확인할 수 있었다. 그림 6은 SRIM과 수정된 TRIM 프로그램으로부터 계산된 전자 및 핵정지단면적을 나타내고 있다. 에너지가 160 keV에서 실리콘에서 안티몬의 핵 정지단면적의 최대값은 199.9 eV/Å를 나타내고 있다. 1 MeV에서 10 MeV 에너지 영역에서  $S_n$ 의 값은 147.1 eV/Å에서 43.11 eV/Å로 감소하고 있다. 그림 6에서 나타난 것처럼 1 keV에서 100 MeV까지의 에너지영역에서 전자정지단면적은 에너지에 비례하여 증가하고 있으나 핵정지단면적은 1 keV에서 증가하다가 160 keV에서 다시 감소함을 확인할 수 있다.

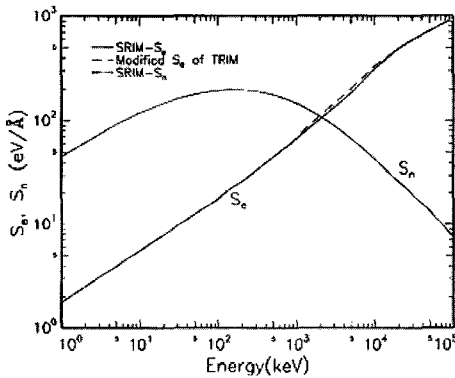


그림 6. TRIM, 전자정지력이 수정된 TRIM 과 SIMS 농도분포의 비교.

Fig. 6. Comparison with TRIM, modified TRIM and SIMS profiles.

측정된 SIMS 데이터와 컴퓨터모의실험의 계산된  $R_p$ 와  $\Delta R_p$ 를 왼쪽과 오른쪽 축의 값으로 각각 그림 7에 나타내었다.  $R_p$ 는 SRIM의 데이터가 가장 큰 값을 나타내고 있다. 5~10 MeV의 에너지 영역에서는 SRIM 데이터의 결과로부터 안티몬의 사정거리  $R_p$ 가 가장 깊게 나타남을 알 수가 있다. 따라서 본 연구에서는 전자정지력을 수정하여 그림 7에 나타난 것 처럼 SIMS 데이터와 잘 일치하도록 하였다. 표 3에서 수정된 TRIM 컴퓨터모의 실험의 결과가 얼마나 잘 일치하는가를 SIMS 와 SRIM 데이터와 서로 비교하여 수치로 표 3에 나타내었다. 표3에서 나타나 있듯이  $R_p$ 의 값이 5~10 MeV의 에너지 영역에서 SIMS 데이터와 비교

해서 더 큰 값을 나타내었다. 이 이유는 전자정지력을 과대평가하였기 때문이라고 사료된다. 전자정지력을 수정한 TRIM데이터는 SRIM데이터와 비교해서  $R_p$ 와  $\Delta R_p$  모두 다 개선된 결과를 나타내었다.

표 3. SRIM, SIMS 데이터와 수정된 TRIM 데이터의 비교.

Table 3. Comparison of data with SRIM, SIMS and modified TRIM.

MeV	SIMS와 컴퓨터 모의실험의 결과	$R_p(\mu m)$	$\Delta R_p(\mu m)$
5	SIMS	2.03	0.492
	SRIM	2.11	0.256
	Modified TRIM	2.01	0.351
6	SIMS	2.36	0.528
	SRIM	2.48	0.282
	Modified TRIM	0.23	0.352
7	SIMS	2.64	0.566
	SRIM	2.83	0.303
	Modified TRIM	2.66	0.381
8	SIMS	3.0	0.633
	SRIM	3.15	0.322
	Modified TRIM	2.96	0.394
9	SIMS	3.30	0.694
	SRIM	3.45	0.338
	Modified TRIM	3.24	0.407
10	SIMS	3.63	0.676
	SRIM	3.73	0.351
	Modified TRIM	3.50	0.422

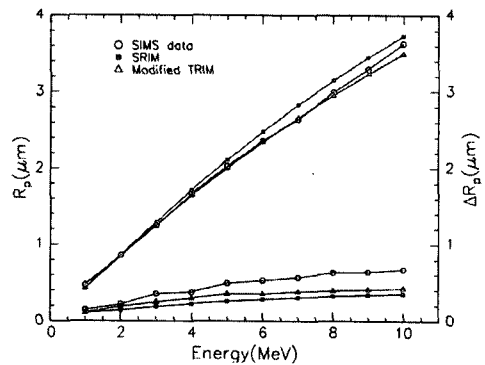


그림 7. 측정된 SIMS 데이터와 계산된  $R_p$  와  $\Delta R_p$ 의 비교.

Fig. 7. Comparison with SIMS and simulated data for  $R_p$  and  $\Delta R_p$ .

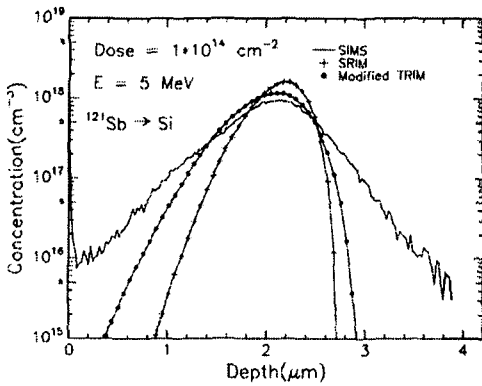


그림 8. SIMS, SRIM, 수정된 전자정지력을 적용한 TRIM 의 안티몬의 농도분포 비교.

Fig. 8. Comparison with antimony profiles from SIMS, SRIM, and TRIM with modified electronic stopping power.

차정지단면적모델보다 더 개선된 결과를 제시하였다. 반면에  $\Delta R_p$  는 SIMS 데이터가 가장 크게 나타났고 SRIM과 수정된 TRIM은 상대적으로 작은 값을 나타내었다. 그림에도 불구하고 전자정지단면적을 수정한 수정된 TRIM의 데이터가 약간의 개선된  $\Delta R_p$  값을 나타냄을 확인 하였다.

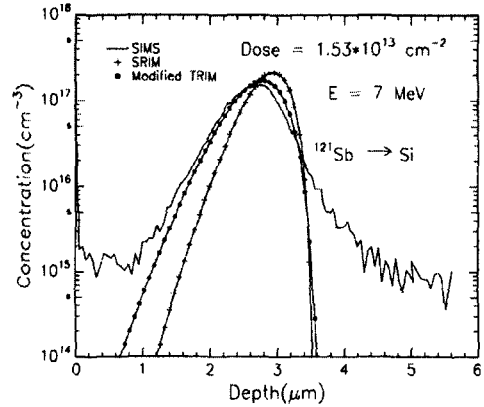


그림 10. SIMS, SRIM, 수정된 전자정지력을 적용한 TRIM 의 안티몬의 농도분포 비교.

Fig. 10. Comparison with antimony profiles from SIMS, SRIM, and TRIM with modified electronic stopping power.

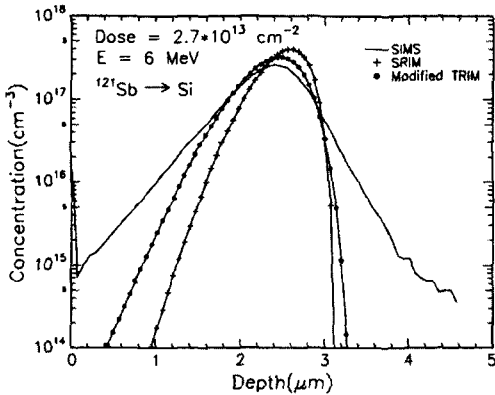


그림 9. SIMS, SRIM, 수정된 전자정지력을 적용한 TRIM 의 안티몬의 농도분포 비교.

Fig. 9. Comparison with antimony profiles from SIMS, SRIM, and TRIM with modified electronic stopping power.

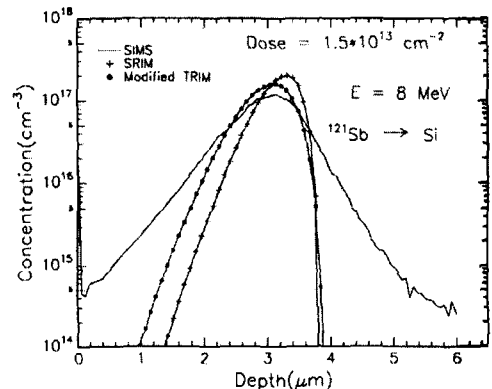


그림 11. SIMS, SRIM, 수정된 전자정지력을 적용한 TRIM 의 안티몬의 농도분포 비교.

Fig. 11. Comparison with antimony profiles from SIMS, SRIM, and TRIM with modified electronic stopping power.

또한 안티몬의 농도분포는 그림 8-그림 13에서 나타낸 것처럼 전자정지단면적을 수정한 모델이 SIMS 데이터와 잘 일치하고 있음을 확인할 수가 있다. 특히 최대농도의 깊이에서 수정된 TRIM 데이터가 SRIM 데이터 보다 SIMS 데이터와 잘 일치하여 기존의 SRIM에서 적용되고 있는 ZBL 전

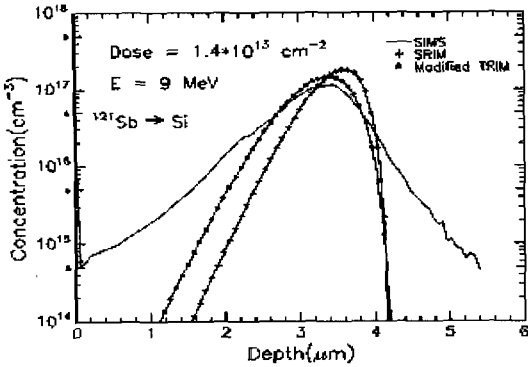


그림 12. SIMS, SRIM, 수정된 전자정지력을 적용한 TRIM의 안티몬의 농도분포 비교.  
 Fig. 12. Comparison with antimony profiles from SIMS, SRIM, and TRIM with modified electronic stopping power.

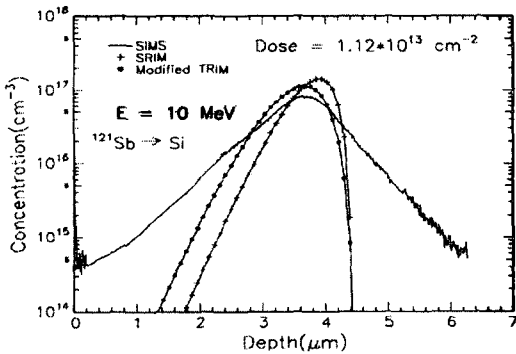


그림 13. SIMS, SRIM, 수정된 전자정지력을 적용한 TRIM의 안티몬의 농도분포 비교.  
 Fig. 13. Comparison with antimony profiles from SIMS, SRIM, and TRIM with modified electronic stopping power.

### 3. 안티몬이온의 이차원 농도분포

일반적으로 가우스분포의 이차원적인 농도분포는 수직과 측면방향으로의 분포를 동시에 나타냄으로서 이차원적인 농도분포를 나타낼 수 있고 수식으로 (7) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$C(x, y) = C_{i,m}(x) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_y} \exp\left(\frac{-y^2}{2\Delta R_y^2}\right) \quad (7)$$

여기서 y는 주입된 이온의 입사방향이 x입으로 여기에서 수직인 측면방향을 나타내며,  $\Delta R_y$ 는 측면방향으로의 이온분포의 표준편차를 나타낸다. 이온주입창의 폭이 6  $\mu\text{m}$ 인 실리콘패턴으로 안티몬이온주입을 수행한 후에 TSUPREM4 컴퓨터모의실험의 결과를 그림 14에서 그림 18까지 나타내었다. 마스크로 사용된 산화막(SiO<sub>2</sub>)의 두께는 1.5  $\mu\text{m}$ 이고 실리콘의 기판의 두께는 1.3  $\mu\text{m}$ 로 나타내었다. 이 경우에 1 MeV의 에너지에서 도즈가  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 인 안티몬이 실리콘에 주입된 이차원적인 안티몬이온의 분포를 열처리전과 후에 대해서 각각 그림으로 나타내었다. TSUPREM4 컴퓨터프로그램을 적용하여 측정된 SIMS 데이터를 이차원적인 분포로 확장하였다. 그림에서 나타난 평형농도분포는  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 으로 부터  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 의 값을 나타내었다. 평형농도등고선의 간격은 로그스케일로 1의 간격으로 나타내었다. 측정된 SIMS 데이터에서 발췌된  $R_p$ 는 0.47  $\mu\text{m}$ 이고,  $\Delta R_p$ 는 0.143  $\mu\text{m}$ ,  $\nu$ 는 0.725,  $\beta$ 는 5.142의 모멘트(moment's)값을 각각 나타내었다.

$\Delta R_y$ 는 SRIM에서 0.0787  $\mu\text{m}$ , 수정된 TRIM에서는 SRIM 보다 다소 더 큰 값을 나타내는 0.07929  $\mu\text{m}$ 를 각각 나타내었다. 그림 14와 15는 마스크창의 수직선에서 서로 다른 입사각으로 주입된 안티몬의 농도분포를 나타내고 있다. 그림 14는 0°의 경사각인 수직입사 후에 개방된 창 중심인 5  $\mu\text{m}$ 에서 정확히 오른쪽과 왼쪽이 대칭적인 안티몬이온의 분포를 나타내고 있다.

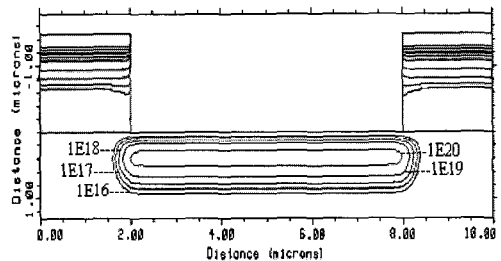


그림 14. 안티몬 이온의 이온주입후에 SIMS 데이터를 확장하여 나타난 이차원적인 농도분포.

Fig. 14. Two-dimensional antimony profiles using extension of one-dimensional SIMS data (E=1 MeV, 0° tilt, Dose=  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ).



그림 15는 수직선에서 7°의 경사각으로 주입되었기 때문에 입사후에 개방된 창 중심에서 왼쪽보다 오른쪽에 다소 더 많은 안티몬이온의 분포를 나타내고 있다.

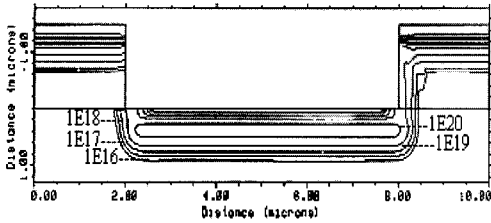


그림 15. 안티몬 이온의 이온주입후에 SIMS 파라미터를 확장하여 나타난 이차원적인 농도분포.

Fig. 15. Two-dimensional antimony profiles using extension of one-dimensional SIMS data (E=1 MeV, 7° tilt, Dose= $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ).

그림 16, 17과 18은 질소와 산소가스에서 1000 °C에서 30 분간 열처리한 후에 나타난 안티몬의 분포이다. 그림 16은 열처리전의 그림 14와 비교해서 형태는 비슷한 형태이고 측면방향보다 수직방향으로 확산효과에 의해서 다소 더 깊은 농도분포를 나타내고 있다. 그림 17은 그림 15 보다 확산효과에 의해서 다소 오른쪽방향으로 기울어진 형태이고, 수직방향으로는 더 깊은 분포를 나타내고 있다.

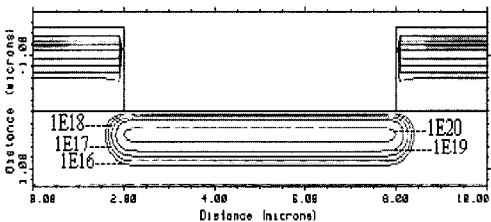


그림 16. 안티몬 이온의 이온주입후에 SIMS 파라미터를 확장하여 질소가스분위기에서 열처리후에 나타난 이차원적인 농도분포.

Fig. 16. Two-dimensional annealed antimony profiles under nitrogen ambient using extension of one-dimensional SIMS data (E= 1 MeV, 0° tilt, Dose= $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , T= 1000 °C, time=30 min.).

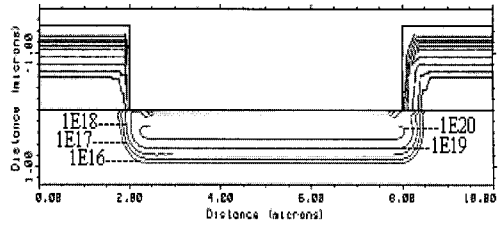


그림 17. SIMS 파라미터를 확장하여 안티몬 이온의 질소가스분위기에서 열처리후에 나타난 이차원적인 농도분포.

Fig. 17. Two-dimensional annealed antimony profiles under nitrogen ambient using extension of one-dimensional SIMS data (E=1 MeV, 7° tilt, Dose= $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , T= 1000 °C, time=30 min.).

그림 18은 불활성가스인 질소 대신에 산소가스 분위기에서 열처리 한 경우에 나타난 안티몬의 분포를 나타내고 있다. 본 실험에서 사용된 산화방법은 습식산화방법으로 1000 °C의 온도에서 30분간 열처리 후에 산화막의 두께는 TSUPREM4에서는 그림 18에서 나타난 것처럼 0.225 μm를 나타내었다. 그림 18에 나타난 것처럼 산소가스에서 열처리한 경우 질소가스 분위기에서 열처리한 그림 17과 비교하여 보면 ORD효과 때문에 측면과 수직방향으로의 깊이가 다소 더 작아짐을 확인할 수 있었다.

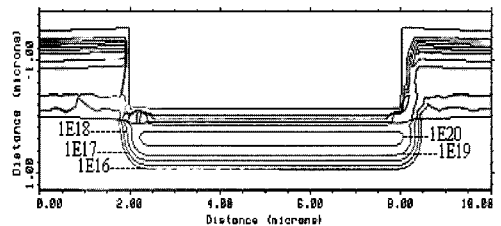


그림 18. 안티몬 이온의 SIMS데이터를 확장하여 산소가스분위기에서 열처리 후에 이차원적인 농도분포.

Fig. 18. Two-dimensional annealed antimony profiles under oxygen ambient using extension of one-dimensional SIMS data. (E=1 MeV, 7° tilt, Dose= $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , T= 1000 °C, time=30 min.).

#### 4. 결 론

본 연구는 MeV 이온으로 주입된 안티몬 이온의 농도분포와 사정거리에 대한 전자 및 핵정지력에 대해서 개선된 모델을 제시하였고 자세히 설명하였다. 특히 5 MeV에서 10 MeV의 에너지 영역에서는 전자정지단면적을 수정하여 측정된 SIMS 데이터와 잘 일치하는 안티몬 이온의 분포를 구할 수 있었다. MeV의 에너지영역에서는 전자정지단면적이 수식 (6)에 나타난 것처럼  $\sqrt{E}$ 에 비례하는 항에 추가적으로 E에 비례하는 수식으로 나타냄으로서 그림 8부터 그림 13에 나타난 것처럼 최대농도의 깊이에서 SIMS 데이터와 잘 일치하는 전자정지단면적의 값을 구할 수 있었다. 따라서 현재의 SRIM2003 프로그램에서 사용된  $S_e$  대신에 수정된  $S_e$  값을 적용하여 1 MeV에서 10 MeV의 에너지 영역에서 더 개선된 농도분포를 나타낼 수 있었다. 안티몬이온의 열처리 후에  $N_2$  와  $O_2$  가스분위기에서 열처리하여 ORD효과가 나타남을 SR측정과 ICECREM 컴퓨터모의실험결과를 통해서 비교 및 확인 할 수 있었다. TSUPREM4 프로그램을 이용하여 이차원적인 농도분포를 그림으로 나타내었다. 열처리후에 질소가스분위기의 열처리에서 측면방향 보다 수직방향으로 다소 더 많은 확산효과가 나타났고 산소가스 분위기 열처리에서는 ORD효과를 확인할 수 있었다. 컴퓨터모의실험 결과를 통하여 나타난 안티몬 이온의 도핑 분포는 다양한 형태의 소자제작에 적용할 수 있다고 사료된다.

#### 감사의 글

본 논문은 2002년도 경기대학교 해외파견 연구비지원에 의해 연구되었습니다.

#### 참고 문헌

[1] J. F. Ziegler, "High Energy Ion Implantation", Nucl. Inst. Physics Research, B6, p. 270, 1985.  
 [2] Hans P. Zappe and Chenming Hu, "Device Characteristics of MOSFETS in MeV Implanted Substrates", Nucl. Inst. Physics Research, B21, p. 163, 1987.  
 [3] J. P. Biersack, "Basic Physical Aspects of

High Energy Implantation", Nucl. Inst. Physics Research, B35, p. 205, 1988.  
 [4] K. Tsukamoto, T. Kuroi, S. Komori, and Y. Akasaka, "High energy ion implantation for ULSI", Solid State Tech. Vol. 1, No. 1, p. 49, 1992.  
 [5] Badih El-Kareh, "Fundamentals of Semiconductor Processing Technology", Kluwer Academic Publishers, p. 352, 1995.  
 [6] J. D. Plummer, M. D. Deal, and P. B. Griffin, "Silicon VLSI Technology", Prentice Hall, Inc., p. 451, 2000.  
 [7] O. W. Holland and D. Fathy, "Annealing of Sb<sup>+</sup> ion-implanted Si", J. Appl. Ph Vol. 63, No. 11, p. 5326, 1988.  
 [8] 김상용, 최민호, 김남훈, 정현상, 장의구, "안티몬 이온주입시 Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 빔튜닝 방법 및 모니터링연구", 전기전자재료학회논문지, 17권, 5호, p. 476, 2004.  
 [9] S. J. Morris, B. Obradovic, S. H. Yang, and AL. F. Tasch, "Modeling of Boro Phosphorus and Arsenic Implants into Single-crystal Silicon over a wide Energy Range (Few keV to Several MeV)", IEDM Technical Digest, p. 721, 1996.  
 [10] 정원채, "실리콘에 MeV로 이온주입된 인의 결함분포와 profile에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 10권, 9호, p. 881, 1997.  
 [11] 정원채, "실리콘에 붕소의 고에너지 이온주입에 의한 농도분포에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 15권, 4호, p. 289, 2002.  
 [12] C. Park, K. M. Klein, and A L. F. Tasch, "Efficient modeling parameter extraction for dual pearson approach to simulate of implanted impurity profiles in silicon", Solid State Electronics, Vol. 33, No. 6, p. 645, 1990.  
 [13] TSUPREM4 is a version of SUPREM-IV from Avant! Inc. SUPREM IV was originally written at Stanford University by M. E. Law, C. S. Rafferty, and R. W. Dutton.  
 [14] H. Ryssel, J. Lorenz, and W. Kreuger, "Ion Implantation into non-planar Targets: Monte Carlo Simulations and Analytical Models", Nucl. Inst. Physics Research, B19, p. 45, 1987.

- [15] User's Guide, "ICECREM 1996 manual", Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS-B) Schottky St. 10, Erlangen, Germany.
- [16] J. P. Biersack and L. G. Haggmark, "A Monte Carlo Computer Program for the Transport of Energetic Ions in Amorphous Targets", Nucl. Inst. Physics Research., Vol. 174 p. 257, 1980.
- [17] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and U. Littmark, "The Stopping and Range of Ions in Solids", Pergamon, New York, 1985.
- [18] J. F. Ziegler, "The stopping of energetic light ions in elemental matter", J. Appl. Phys., Vol. 2, No. 3, p. 1249, 1999.
- [19] J. F. Ziegler, "SRIM 2003 manual", <http://www.srim.org/>
- [20] D. J. O'Connor, and J. P. Biersack, "Comparison of Theoretical and Empirical Interatomic Potentials", Nucl. Inst. Physics Research, B15, p. 14, 1986.
- [21] J. P. Biersack and J. F. Ziegler, "Refined Universal Potentials in Atomic Collisions", Nucl. Inst. Physics Research, Vol. 194, p. 93, 1982.