

실리콘에 붕소의 고에너지 이온주입에 의한 농도분포에 관한 연구

A Study of Boron Profiles by High Energy Ion Implantation in Silicon

정원채

(Won-Chae Jung)

Abstract

In this study, the experiments are carried out by boron ion implantation at energies ranging from 700keV to 2MeV in silicon. The distribution of boron profiles are measured by SIMS(Cameca 6f). Boron dopants profiles after high temperature annealing are also explained by comparisons of experimental and simulated data. A new electronic stopping model for Monte Carlo simulation of high energy implantation is presented. Also the comparisons of profiles by isotropic boron ion implantations are demonstrated and interpreted with theoretical models. Finally range moments of SIMS and SRP profiles are calculated and compared with simulation results.

Key Words : MeV implantation, Annealing(RTA, Furnace), SIMS, SRP, Process simulation

1. 서론

MeV 이온주입 기술은 1990년대 초반부터 신뢰성 있는 장비의 개발로 말미암아 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 붕소의 고에너지 이온주입에 대하여, 실험데이터와 컴퓨터모의실험의 결과를 다양한 관점에서 서로 비교 및 분석하였다. 반도체에서 이온의 정지력에 대한 계산은 [1,2] Ziegler등에 의해서 비정질기판에서 상호원자 전위, 정지력, 이온분포가 광범위하게 설명되어졌다. 그러나, 주입된 이온의 실험적인 측정결과와 컴퓨터모의실험의 결과 사이에 차이점을 이해하기 위해서 아직도 불확실하게 남아있는 내용과 알려지지 않은 점들이 많이 있다. 고에너지 이온주입 기술은 집적회로에서 매립층(buried layer), 역행우물(retrograde well), 물질변형, 에피택시(epitaxy)

[3-10] 방법을 이용하지 않고 매립된 컬렉터(buried collector) 층의 제작등 여러분야에 응용이 되고 있다. 이온의 농도분포는 SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry)측정과 이온의 전기적인 활성화를 위해서 RTA(Rapid Thermal Annealing), 전기로열처리후에 SRP(Spreading Resistance Profile) 측정과 컴퓨터모의실험의 결과를 서로 비교하여, 농도분포, 열처리후에 확산효과에 대한 설명을 하였다. 여기서 사용된 모의실험은 Monte Carlo 프로그램인 TRIM(Transport of Ions in Matter)[11-13], SRIM(Stopping and Range of Ions in Matter)[11-16] 과 Pearson 함수를 이용한 ICECREM(Integrated Circuits and Electronics group Computerised Remedial Education and Mastering)[17,18] 프로그램을 이용하여 모의실험을 수행하였다. 본 논문에서는 TRIM과 SRIM의 컴퓨터모의실험 결과와 SIMS 실험결과를 비교분석하였고, 아울러 수정된 전자정지력을 적용하여 개선된 분석적인 모델을 제시하고자 한다.

경기대학교 전자공학과

(경기도 수원시 팔달구 이의동 산 94-6

FAX : 031-249-9796, TEL : 031-249-9803

E-mail : wcjung@kuic.kyonggi.ac.kr)

2001년 9월 12일 접수, 2001년 10월 19일 1차심사완료,

2001년 11월 23일 2차심사완료, 2001년 12월 10일 3차

심사완료, 2001년 12월 31일 최종심사완료

2. 모델분석

이온주입된 이온의 분포는 4개의 모멘트로써 농도분포를 재구성할 수가 있는데, 깊이에 따른 농도는 식(1)로 나타내어진다.

$$C(x) = C_{\square} \cdot f(x) \quad (1)$$

여기서 C_{\square} 는 주입된 이온의 주입량을 나타내고 $c(x)$ 는 깊이에 따른 농도를 의미하며, $f(x)$ 는 규격화된 분포함수이다.

$$C_{\square} = \int_0^{\infty} C(x) \cdot dx \quad (2)$$

첫 번째 모멘트(moment)로서 수직으로 입사된 이온의 평균 깊이는 식(3)으로 나타내어진다.

$$R_p = \int_0^{\infty} x \cdot f(x) \cdot dx \quad (3)$$

두 번째 모멘트로서 표준편차(ΔR_p)는 식(4)로 나타내어진다.

$$\Delta R_p^2 = \int_0^{\infty} (x - R_p)^2 \cdot f(x) \cdot dx \quad (4)$$

세 번째 모멘트로서 비스듬한정도(skewness: γ)는 농도분포의 무게중심의 이동을 나타내며, 식(5)에 나타내었다. γ 가 양의 값이면 오른쪽으로 음의값을 가지면 왼쪽으로 무게중심이 각각 이동하는 정도를 나타낸다.

$$\gamma = \int_0^{\infty} \frac{(x - R_p)^3 \cdot f(x) \cdot dx}{\Delta R_p^3} \quad (5)$$

네 번째 모멘트로서 뾰족한정도(kurtosis: β)는 농도분포의 뾰족한 정도를 나타내며 식(6)으로 나타내었다. β 의 값이 크면 농도분포의 형태가 더 뾰족하게 되고 β 의 값이 작아지면 첨두치 농도영역에서 완만한 분포의 형태를 나타내게 된다.

$$\beta = \int_0^{\infty} \frac{(x - R_p)^4 \cdot f(x) \cdot dx}{\Delta R_p^4} \quad (6)$$

수식 (1)-(6)은 이온분포의 계산에 일반적으로 적용되는 수식이고 이온분포에 대한 다양한 이론적

인 모델들은 2.1에서 2.3까지 나타내었다.

2.1 Gauss 모델

주입된 이온의 분포는 일반적으로 두 개의 모멘트를 가진 대칭적인 형태의 가우스 분포함수로 수식(7)로 나타내어진다.

$$C(x) = \frac{C_{\square}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \Delta R_p}} \cdot \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2 \cdot \Delta R_p^2}\right] \quad (7)$$

가우스 분포는 수식 (7)에서 나타난 것 처럼 R_p 와 ΔR_p 두 개의 파라미터로써 나타나게 된다. 이때에 프로파일의 대칭성 때문에 $\gamma=0$ 이고 $\beta=3$ 의 값을 나타낸다. 이온주입된 후 열처리후에 나타나는 가우스 형태의 농도분포는 식 (7)에서 ΔR_p 대신에 $\sqrt{(\Delta R_p^2 + 2Dt)}$ 의 식을 대입하면 된다. 무거운 이온인 ^{75}As , ^{121}Sb 등은 대체적으로 가우스분포가 실험데이터와 잘 일치하지만, 상대적으로 가벼운 붕소이온의 고에너지이온주입 경우는 실리콘 기판의 표면에서 붕소이온의 많은 반사(reflection)가 나타나서, 농도분포의 형태가 비대칭적인 형태를 나타나게 되므로 가우스 분포함수의 농도분포의 형태로는 이온분포를 묘사할 수가 없게된다. 이 경우 3, 4 번째의 모멘트를 가진 Pearson 함수를 이용함으로써 실험 데이터를 맞추는 것이 더 적합하다. 이러한 4개의 모멘트로부터 모든 이온분포를 재구성할 수가 있다.

2.2 ICECREM 모델

Pearson 함수들은 식(8)의 해로서 나타나게 되는데, 분포함수 $f(x)$ 에 대한 미분방정식은 식(8)과 같다.

$$\frac{df}{dy} = \frac{y - a}{b_0 + b_1 \cdot y + b_2 \cdot y^2} \cdot f(y) \quad (8)$$

여기서 $y=x-R_p$ 이고 a, b_0, b_1, b_2 , 는 다음의 식들로서 나타내어진다.

$$a = -\frac{\Delta R_p \cdot \gamma \cdot (\beta + 3)}{A} \quad (9)$$

$$b_0 = - \frac{\Delta R_p^2 \cdot (4\beta - 3\gamma^2)}{A} \quad (10)$$

$$b_1 = a \quad (11)$$

$$b_2 = - \frac{(2\beta - 3\gamma^2 - 6)}{A} \quad (12)$$

여기서 분모항 $A=10\beta - 12\gamma^2 - 18$ 이다.

미분방정식 식(8)로 부터 parameter의 크기에 따라서 7개의 서로 다른 형태의 함수들이 주어지게 된다. 저에너지와 고에너지 이온주입에 자주 이용되는 형태는 Pearson-IV의 함수로서 식(13)으로 나타내어진다.

$$f(x) = K \cdot |b_0 + b_1(x - R_p) + b_2(x - R_p)^2|^{\frac{1}{2b_2}} \cdot \exp \left[\frac{(b_1/b_2 + 2b_1)}{\sqrt{4b_0b_2 - b_1^2}} \cdot \arctan \frac{2b_2(x - R_p) + b_1}{\sqrt{4b_0b_2 - b_1^2}} \right] \quad (13)$$

여기서 K 는 $\int_0^\infty f(x)dx = 1$ 이 될 때의 상수이고 γ 와 β 값의 영역은 식(14)로 나타내어진다.

$$0 < \gamma^2 < 32, \quad \beta > \frac{39\gamma^2 + 48 + 6(\gamma^2 + 4)^{1.5}}{32 - \gamma^2} \quad (14)$$

2.3 TRIM 및 SRIM 모델

Monte Carlo 프로그램인 TRIM(Transport of Ions in Matter)과 SRIM(Stopping and Range of Ions in Matter)는 이온주입후에 이온의 분포와 사정거리(range)를 계산하는 프로그램이다.

TRIM(Transport of Ions in Matter) 프로그램은 주입된 이온이 기판원자와 이진핵충돌(binary nuclear collision)에 의해서 모의공정실험이 실행된다. 충돌변수(impact parameter) P 와 이온의 에너지 변화와 여러방향의 방위각(azimuth angle) ϕ 에 의해서 계산이 실행된다. 충돌사이의 경로 λ 는 일직선으로 가정한다. 비탄성적인 정지(Inelastic stopping) 작용은 이온들의 운동에너지를 고려하여 충돌변수(impact parameter) P 에 종속이거나 독립

적인 에너지손실에 기인한다. 이온의 모의실험은 기판의 밖으로 이온의 위치가 나타나거나, 이온의 운동에너지가 사전에 규정된 경계값 E_F (final energy)보다 작을때 계산을 종료하게된다. 핵정지력(nuclear stopping power)은 ZBL(Ziegler Biersack Littmark)의 원자간 상호전위(interatomic potential)에 의해서 계산되고, 전자정지력(electronic stopping power)은 ZBL(Ziegler Biersack Littmark)의 모든 기판에서 낮은에너지와 높은에너지의 구간을 합성한 형태로 나타난 계산식에 의해서 구해진다. TRIM 프로그램을 이용한 컴퓨터모의실험은 단결정이 아닌 비정질 기판에서의 불순물 농도-깊이 분포를 나타낸다. 그러나 실제적으로는 단결정에 주입된 이온들은 거의 채널링꼬리(channeling tail)를 나타내고 있다. 이러한 이유때문에 이온주입시 채널링(channeling) 효과를 억제하기 위해서 보통 7°의 각도로 빔라인(beam line)을 기울게(tilting)하여 실험하고 있다. 그럼에도 불구하고 이러한 채널링(channeling) 효과는 기판원자들과의 차단효과에 의한 소위 역채널링(dechanneling) 효과에 의해서 다시금 원자들 사이로 채널링(channeling) 효과가 나타난다. TRIM 프로그램의 알고리즘은 다음과 같다[11-13].

- 1) 기판에 수직선에 대한 충돌각과 초기에너지를 설정한다.
- 2) 무작위수(random number)가 설정되고 충돌변수 P 와 에너지가 계산된다.
- 3) 여러방향의 방위각(azimuth angle) ϕ 에 계산을 통하여 핵정지력이 계산되어진다.
- 4) 이온과 전자와의 상호작용에 의한 에너지 손실이 계산된다.
- 5) 충돌후에 새로운 이온의 에너지가 계산된다.
- 6) 이온의 이동에 따른 새로운 경과각이 계산되어진다.
- 7) 이온이 기판속으로 침투하면서 새로운 이온의 위치가 계산된다.
- 8) $x < 0$ 이면 이온이 표면에서 반사를 나타내며, 알고리즘을 벗어나게 된다. 이온이 다른 물질속의 경계를 가로질러 가면, 타겟에서의 단위체적당 원자의 수에 대한 새로운 값을 계산하게 된다.
- 9) 이온에너지가 사전에 정의된 차단에너지 E_F 이하로 감소하면, 마지막의 위치(x,y)가 기록되고 알고리즘을 떠나게 된다. 다른 경우는 2번의 단계로 되돌아가서 계산을 다시 수행하게 된다.

반면에 SRIM 프로그램은 기존의 TRIM 프로그램의 계산방식에서 가벼운 이온들의 고에너지 정지력을 새롭게 개선시킨 프로그램이다[14,16]. 1 MeV/amu 보다 더 빠른 이온에 대한 고에너지에 대한 정지력의 값이 평균이온화 전위(mean ionization potential)를 변경하여서 새로운 전자 및 핵정지력의 값으로 계산하였다. 이러한 값들은 단원자기관과는 달리 화합물기관에서 나타나는 원자들에 대해서도 또한 변경된 값을 나타내고 있다.[16] 이미 발표된 계산식에서[15] 다음의 수정된 수식을 사용하였다.

$$\text{수정} = \frac{1 + (CC - 1)}{(1 + \text{Exp}(1.48 * \text{Sqr}((E/M_1)/25) - 7))}$$

여기서 수정(correction)은 무변경(default)일때는 1의 값을 나타낸다. 그림1에서 TRIM 프로그램의 플로우 차트(flow chart)를 나타내고 있다.

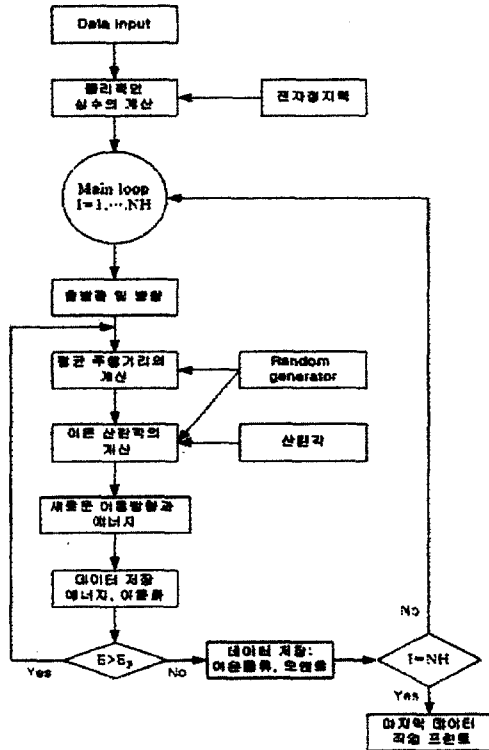


그림 1. TRIM 프로그램의 플로우 차트.

Fig. 1. Flow chart of TRIM program.

3. 실험 및 컴퓨터 모의실험 결과의 분석

그림 2와 3은 TRIM과 SRIM컴퓨터모의실험 결과로부터 밝혀진 ¹⁰B와 ¹¹B의 전자정지력과 핵정지력데이터를 그림으로 도시하고 있다. 그림 2에서는 ¹⁰B의 TRIM과 SRIM의 전자 및 핵정지력을 나타내고 있다. 핵정지력은 그림에서 나타난 것처럼 차이가 거의 없으며, 전자정지력은 200keV 이상의 에너지 영역부터 약간의 차이를 나타내고 있다. SRIM의 경우 1.71 MeV에서 최대전자정지력(electronic stopping power)의 값은 98.61 eV/Å 이고 3 keV에서 최대핵정지력(nuclear stopping power)은 8.314 eV/Å를 나타내었다.

그림 3은 ¹¹B의 TRIM과 SRIM의 전자 및 핵정지력을 나타내고 있다. 핵정지력은 ¹⁰B과 마찬가지로 차이가 거의 없으며, 전자정지력은 200keV 이상의 에너지 영역부터 약간의 차이를 나타내고 있다. ¹⁰B의 경우에 SRIM의 최대전자정지력의 값은 1.8 MeV에서 98.59 eV/Å 이고 최대핵정지력은 3.3 keV에서 8.912 eV/Å를 나타내었다. TRIM의 경우 1.75 MeV에서 최대전자정지력의 값은 SRIM보다 다소 높은 값인 101.06 eV/Å 이고 최대핵정지력은 3.3 keV에서 8.313 eV/Å를 나타내었다. ¹¹B의 경우에 SRIM의 최대전자정지력의 값은 1.8 MeV에서 98.59 eV/Å 이고 최대핵정지력은 3.3 keV에서 8.912 eV/Å를 나타내었다. TRIM의 경우 1.9 MeV에서 최대전자정지력의 값은 SRIM보다 다소 높은 값인 101.38 eV/Å 이고 최대핵정지력은 2.87 keV에서 9.081 eV/Å를 나타내었다.

반도체집적회로에서 많이 적용되는 CMOS집적회로제작에서 p형의 well 공정시에 붕소이온을 고에너지로 이온주입하게 되는데 이때의 에너지범위는 700keV에서 대략적으로 1.5 MeV가 된다.

본 실험에서는 Genus Ionex 장비인 Tandem 이온주입장치를 이용하여 붕소이온을 700keV에서 2MeV 에너지 범위까지 (100)의 방향성을 가진 p타입의 두께가 675μm 인 6" 실리콘기판에 이온주입하였다. 이때에 이온의 채널링효과를 억제하기 위해서 이온주입시 beam line이 7°의 각으로 기울어지게 하여서 이온주입실험을 수행하였다. 주입된 이온들의 전기적인 활성화를 위해서 전기로열처리로 950°C에서 30분간 질소가스 분위기에서 열처리하였다. 또한 확산효과를 최소화하고 동시에 100% 정도의 전기적인 활성화를 위해서 RTA방법으로 1000°C에서 10초간 텅스텐할로젠 램프를 이용한 급온열처리를 수행하였다. 주입된 붕소의 분

또는 정량분석을 위하여 표준시료를 이용하여 SIMS(Cameca 6f)로 측정하였다. 열처리후에 전기

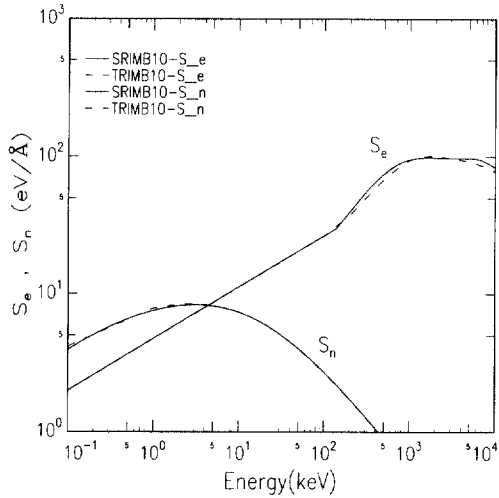


그림 2. 실리콘에서 ^{10}B 의 TRIM과 SRIM의 전자 정지력과 핵정지력의 비교.

Fig. 2. Comparison of electronic and nuclear stopping power of ^{10}B in silicon from TRIM and SRIM.

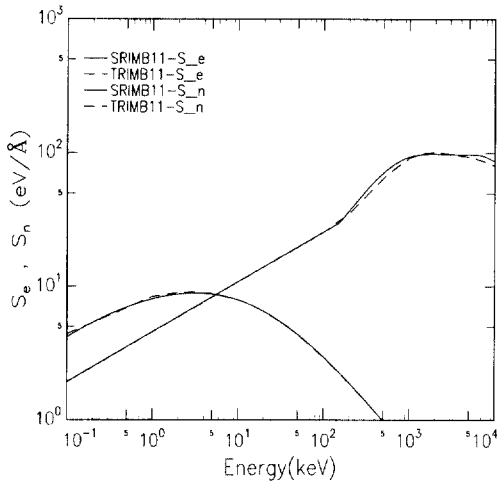


그림 3. 실리콘에서 ^{11}B 의 TRIM과 SRIM의 전자 정지력과 핵정지력의 비교.

Fig. 3. Comparison of electronic and nuclear stopping power of ^{11}B in silicon from TRIM and SRIM.

적으로 활성화된 캐리어의 분포는 SRP(Spreading Resistance Profile)로 측정하여 열처리에 따른 확산효과를 관찰하였다. 또한 0.99 MeV의 에너지에서 붕소의 동위원소(isotope)인 B^{11} 과 B^{10} 원소를 실리콘에 입사각 0° 인 채널링방향으로 이온주입하여 SIMS로 각각의 붕소이온의 분포를 측정하였다. 특히 붕소동위원소 이온주입시에 질량분석(mass separation)을 위해서 B^{++} 의 이온을 이용한 0.99 MeV의 에너지경우에 스위칭마그네틱의 전류는 ^{10}B 에서 9.579 [A] 이었고 ^{11}B 에서 10.047 [A]를 각각 나타내었다. SIMS(Cameca 6f)로 정량분석을 통하여 주입된 붕소의 이온분포를 측정하였다. SIMS측정시 스퍼터수율을 좋게 나타내기 위해서 일차이온으로 O^+ 이온을 사용하였다. 이때에 측정된 조건은 표1에 나타내었다.

붕소이온은 자연상태의존재(natural abundance)가 ^{10}B 가 20%이고 ^{11}B 가 80%인 두 개의 동위원소를 가지고 있다. 그림 3에서 나타나있듯이 ^{11}B 이 ^{10}B 보다 더 깊이 침투한 이온의 분포를 나타내는 이유는 그림 2와 3에서 나타난 것 처럼 500keV 이상의 고에너지에서는 핵정지력 보다 전자정지력이 더 지배적인 관계를 나타내고 있기 때문이다. 같은 에너지에서 ^{11}B 이온은 낮은 에너지에서나 높은 에너지범위에서 항상 ^{10}B 의 이온침투깊이 보다 다소 더 깊은 위치에서 이온이 분포한다. 이러한 이유는 동일한 에너지에서 ^{10}B 의 이온이 ^{11}B 이온보다 더 빨리 움직인다. 따라서 ^{10}B 이온이 ^{11}B 보다 더 높은 전자정지력(electronic stopping power)을 나타내기 때문이다. 이러한 현상 때문에 붕소이온 분포의 꼬리(tail)부분에서 ^{11}B 이 ^{10}B 보다 더 깊이 나타나는 형태를 나타내고 있다. 다른 두가지의 동위원소들과 비교해 본다면, ^6Li , ^7Li 의 동위원소와 ^{121}Sb , ^{123}Sb 의 동위원소에서 질량의 차이가 Li 이온의 경우 (6:7), 붕소의 경우 (10:11), Sb의 경우 (121:123)의 비율로 나타나게 된다. 이러한

표 1. SIMS 측정의 조건.

Table 1. Conditions of SIMS measurements.

Primary Ion Source	O^+
size of the analyzed area	$\Phi 60 \mu\text{m}$
Energy	3 keV
mass resolution	4000
intensity	51nA
Raster size	120 μm
Secondary ion	O^-
Sample High Voltage	5kV

세가지 경우에서도 물론 ^{11}B 이 ^{10}B 보다, ^7Li 이 ^6Li 보다, ^{123}Sb 이 ^{121}Sb 보다 다소 더 깊은 이온의 분포를 나타내게 된다. 동위원소의 이온분포에 따른 깊이의 차이비는 동위원소의 질량차이비에 따라서 $\text{Li} > \text{B} > \text{Sb}$ 로 나타내어진다. 본 연구에서 수행한 0.99 MeV에서 0° 각의 채널링방향으로 $2.53 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 의 도즈로 이온주입한 경우 붕소의 동위원소의 이온분포는 그림 4, 5와 같고 사정거리(range) 변수와 전자와 핵정지력, 사정거리변수(range parameter)는 표 2, 3과 같다.

그림 4에서 수식 (3)에서 식(6)을 적용하여 채널링과 랜덤(random)한 방향으로의 이온주입후에 SIMS로 측정된 실험데이터로부터 계산한 결과는 표 4와 같다. 표 4에서 나타난 것 처럼 채널링방향

표 2. 실리콘에서 0.99 MeV로 이온주입된 ^{10}B 이온의 TRIM 과 SRIM의 simulation 결과의 비교.

Table 2. Comparisons of simulation results from TRIM and SRIM by ^{10}B ion implantation at energy of 0.99 MeV in silicon.

Model	S_e (eV/Å)	S_n (eV/Å)	R_p (μm)	ΔR_p (μm)	γ	β	ΔR_L (μm)
SRIM	94.85	0.535	1.63	0.143	-2.43	14.37	0.2073
TRIM	94.16	0.532	1.718	0.151	-2.5	15.5	0.2262

표 3. 실리콘에서 0.99 MeV로 이온주입된 ^{11}B 이온의 TRIM 과 SRIM의 모의실험결과의 비교.

Table 3. Comparisons of simulation results from TRIM and SRIM by ^{11}B ion implantation at energy of 0.99 MeV in silicon.

Model	S_e (eV/Å)	S_n (eV/Å)	R_p (μm)	ΔR_p (μm)	γ	β	ΔR_L (μm)
SRIM	93.23	0.586	1.7	0.173	-2.42	14.18	0.2167
TRIM	91.39	0.582	1.79	0.16	-2.53	14.58	0.2382

으로 이온주입한 경우에 R_p 와 ΔR_p 가 다소 큰 값을 나타내고 있다. 이것에 대한 물리적인 설명은 그림 3에 나타내었듯이 채널링의 경우 다소 더 깊은 이온의 침투와 채널링에 따른 농도분포의 꼬리(tail)부분에 다소 더 넓은 이온의 분포를 나타내고 있음을 확인하였다.

표 4. 실리콘에서 0.99 MeV로 ^{10}B 과 ^{11}B 이온이 채널링과 랜덤한 이온주입후에 SIMS로 측정된 데이터로부터 모멘트의 계산 결과.

Table 4. Calculation results of range moments from SIMS data by ^{11}B and ^{10}B ion implantation at energy of 0.99 MeV in silicon.

SIMS data	R_p (μm)	ΔR_p (μm)	γ	β
channeling ^{10}B data	1.668	0.1694	-0.5869	14.56
channeling ^{11}B data	1.720	0.1729	-8.376	14.2
random ^{10}B data	1.67	0.1506	-1.876	12.54
channeling ^{11}B data	1.727	0.1634	-1.555	11.87

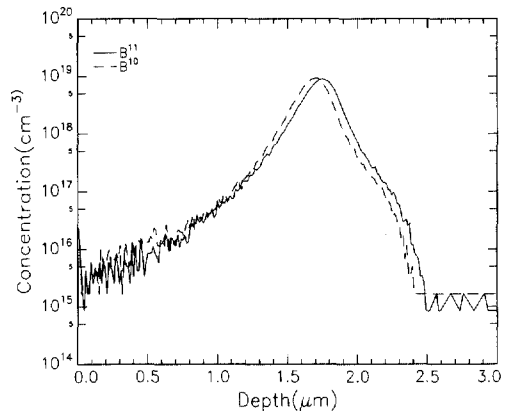


그림 4. 실리콘에서 0.99 MeV로 ^{10}B 와 ^{11}B 이온 주입후에 SIMS로 측정된 농도분포 결과의 비교.

Fig. 4. Comparison of ^{10}B and ^{11}B profiles between SIMS measurements at energy of 0.99 MeV in silicon.

그림 5는 0.99 MeV로 ^{10}B 붕소이온을 이온주입 후에 SIMS로 측정된 농도분포와 TRIM 컴퓨터모의 실험결과를 서로 비교하여 나타내었다. 랜덤하게 회전시켜서 채널링효과를 억제한 경우와 회전시키지 않아서 채널링효과가 나타나는 경우를 컴퓨터모의실험 TRIM 결과와 서로 비교하여 나타내었다. 대체적으로 실리콘 표면에서 농도분포의 최대값 까지는 꽤 잘 일치하고 있다. 그러나 농도분포의 꼬리(tail) 부분에서는 다소간의 편차를 나타내고 있다. 랜덤하게 회전시킨 경우와 TRIM의 결과에서 다소간의 차이를 나타내고 있다. 즉 TRIM 결과는 비정질기판에서의 농도분포를 나타내게 되므로 채널링효과를 무시하였으나 실제상의 단결정실리콘기판에서는 랜덤하게 회전하고 7°의 각으로 기울어서 이온주입하였음에도 불구하고 100%의 채널링효과를 완전히 억제하기는 어렵다고 판단이 된다. 그림 6은 실리콘에 700 keV로 이온주입량인 도즈가 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 로 7°로 기울어서 붕소이온 주입후 SIMS로 측정된 이온의 분포와 컴퓨터모의 실험 결과를 서로 비교하여 나타내고 있다.

이 그림에서 Pearson 함수를 이용한 ICECREM의 프로파일이 SIMS 데이터와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. SRIM 과 TRIM의 컴퓨터모의실험 결과가 표 5에서 나타나 있듯이 전체적으로 SRIM 데이터가 TRIM보다 개선된 결과로써 SIMS로 측

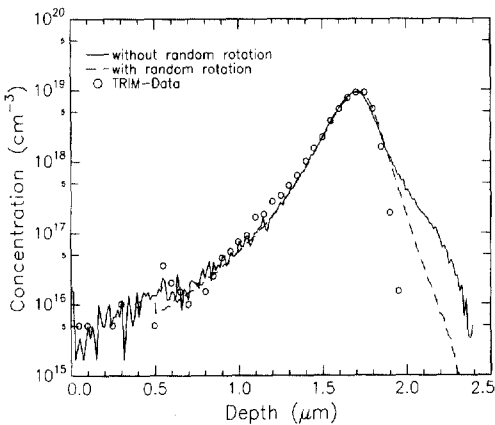


그림 5. 실리콘에서 0.99 MeV로 ^{10}B 붕소이온주입 후에 SIMS로 측정된 농도분포와 시뮬레이션결과의 비교.

Fig. 5. Comparison of ^{10}B profiles between SIMS measurements and TRIM simulation results at energy of 0.99 MeV in silicon.

정된 데이터에 더 근접한 농도분포를 나타내고 있다.

표 5에서 SRIM이 더 높은 전자정지력을 적용하였기 때문에 R_p 값이 작게 나타나고 그림 6에서 이온의 분포가 TRIM보다 왼쪽으로 이동되어 있음을 알 수 있다. 그림 2에서도 전자정지력의 차이를 확인할 수 있다. Ziegler의 전자정지력을 SRIM프로그램에서 다소 변형시켰음에도 불구하고 SIMS 데이터와 다소 편차를 나타내고 있다. 본 연구에서는

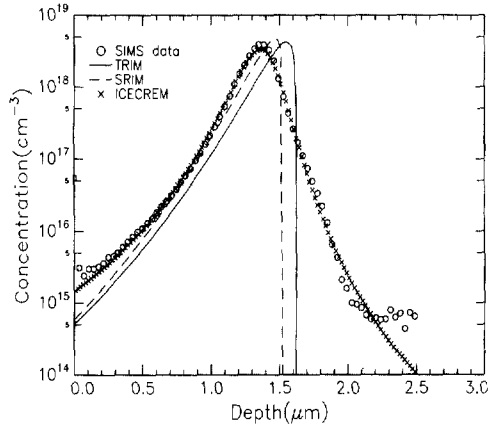


그림 6. 실리콘에서 0.7 MeV로 ^{11}B 붕소이온주입 후에 SIMS로 측정된 농도분포와 시뮬레이션결과의 비교

Fig. 6. Comparison of ^{11}B profiles between SIMS measurements and TRIM, SRIM simulation results at energy of 0.7 MeV in silicon.

표 5. 실리콘에서 0.7 MeV로 ^{11}B 이온의 이온주입 후에 SIMS로 측정된 데이터와 SRIM, TRIM 시뮬레이션의 계산 결과.

Table 5. Calculation results from SIMS and SRIM, TRIM data by ^{11}B ion implantation at energy of 0.7 MeV in silicon.

Model	$R_p(\mu\text{m})$	$\Delta R_p(\mu\text{m})$	γ	β	S_e (eV/A)	S_n (eV/A)
SRIM	1.36	0.145	-2.228	12.15	83.87	0.765
SIMS	1.328	0.159	-1.53	12.56	---	----
TRIM	1.44	0.151	-2.19	12.24	78.64	0.761

SRIM의 전자정지력이 500keV 의 이상의 에너지 영역에서 더 큰 값을 나타내야 한다고 사료된다. 왜냐하면 고에너지에서는 전자정지력이 핵정지력보다 더 지배적이기 때문에 전자정지력을 수정하면 그림 6에서 볼 수 있듯이 최대농도의 지점이 왼쪽으로 이동시켜서 SIMS 데이터와 일치하는 이온분포를 나타낼 수 있는 더 개선된 결과를 얻을 수 있다고 사료된다. 그림 7은 실리콘 기판위에 습식산화방법으로 1 μm 두께의 산화막(SiO_2)층을 가진 구조위에 붕소를 이온주입한후에 1000 $^\circ\text{C}$ 에서 30분간 질소가스분위기에서 전기로을 이용한 열처리한후에 산화막층을 HF로 에칭한후에 SIMS로 측정된 붕소이온의 농도분포와 SRIM, ICECREM 시뮬레이션결과를 나타내고 있다. 최대농도부분에서는 시뮬레이션의 결과가 SIMS 데이터와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 가 있다. 그러나, TRIM 결과는 비정질기판에서 계산한 데이터이기 때문에 붕소이온의 농도분포의 꼬리부분에서 가빠르게 떨어지는 형태를 나타내는 반면에, ICECREM 모의실험결과는 열처리한 SIMS 데이터와 약간의 편차를 나타내었다. 이 이유는 ICECREM 프로그램에서 지정된 확산계수의 값이 다소 낮게 설정되어있다고 사료된다.

그림 7에서 나타난 SIMS 데이터의 깊이가 1.49 μm 에서 최대농도가 $2.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 으로 나타났고 단지

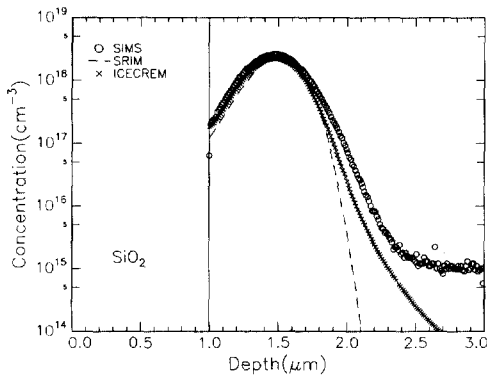


그림 7. 산화막/실리콘에 700keV로 붕소이온주입후에 산화막층제거후에 1000 $^\circ\text{C}$ 에서 30분간 열처리후에 측정된 SIMS 와 모의실험결과의 비교.

Fig. 7. Comparison of annealed SIMS and simulated results after removed SiO_2 layer from boron implantation with 700keV in $\text{SiO}_2/\text{silicon}$.

실리콘 기판에 붕소이온을 도즈가 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 이고 700keV 에너지로 이온주입후에 질소분위기에서 1000 $^\circ\text{C}$ 에서 30분간 열처리후에 나타난 붕소이온의 농도분포는 그림 8과 같다. 그림8에서는 깊이가 1.31 μm 에서 최대농도가 $2.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 으로 나타났다. 따라서 0.18 μm 만큼 표면의 위치가 차이나는 이유는 산화막 성장시에 실리콘기판속으로 침투한 산화막이 에칭시 제거되었기 때문이라고 판단된다.

실리콘기판에 붕소이온을 에너지, $E=1 \text{ MeV}$, 주입량= $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 로 이온주입한후 SIMS로 측정된 붕소의 농도-깊이분포와 950 $^\circ\text{C}$ 에서 30분간 질소가스분위기에서 열처리한 경우와 1000 $^\circ\text{C}$ 에서 10초간 텅스텐 할로겐램프를 사용하여 RTA공정후에 SRP로 측정된 결과를 그림9에 나타내었다. RTA보다 전기로 열처리방법이 SIMS 데이터와 더 일치하는 이유는 전기로 열처리는 RTA 보다 훨씬 더 긴 확산시간 때문에 측정된 SIMS 이온분포의 최대농도점을 중심으로 양쪽이 완만히 균등하게 퍼진 이온분포를 나타내었다. 반면에 RTA측정결과는 매우 짧은 확산시간 때문에 확산의 효과가 상대적으로 적게 나타나기 때문에 실리콘기판속으로 더 얇은 이온의 분포를 나타내고 있다. RTA를 이용한 경우는 p-n 접합깊이가 2.3 μm 이고 노열처리한 경우는 긴 시간의 확산효과에 의해서 p-n 접합깊이가 2.68 μm 를 나타내었다.

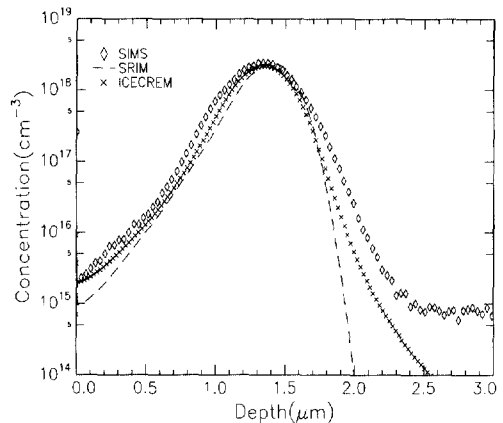


그림 8. 실리콘에 붕소가 이온주입된후 열처리후에 모의실험과 SIMS에 의해서 측정된 농도분포의 비교.

Fig. 8. Comparison of boron profiles by SIMS and simulation in silicon. ($E=0.7\text{MeV}$, $D=10^{14} \text{ cm}^{-2}$, $T=1000^\circ\text{C}$, $t=30 \text{ min}$. N_2 gas).

그림 10은 이온주입에너지가 도즈 $D=1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 인 1.5 MeV, 도즈 $D=2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 인 2 MeV 로 이온주입한후에 SIMS로 측정된 붕소이온

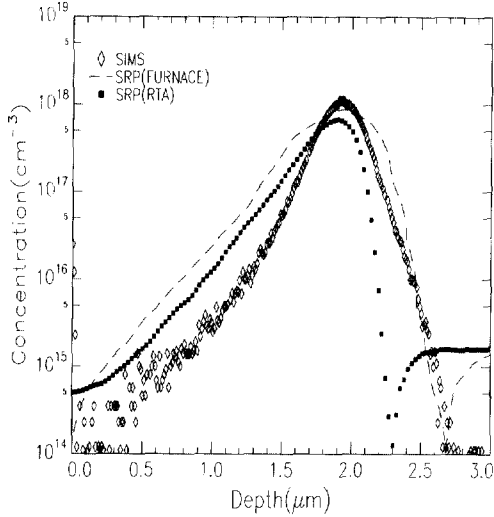


그림 9. 실리콘에서 SIMS와 SRP로 측정된 붕소 이온의 농도분포.

Fig. 9. Measured boron profiles by SIMS and SRP in silicon($E=1.0\text{MeV}$, $D=5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$).

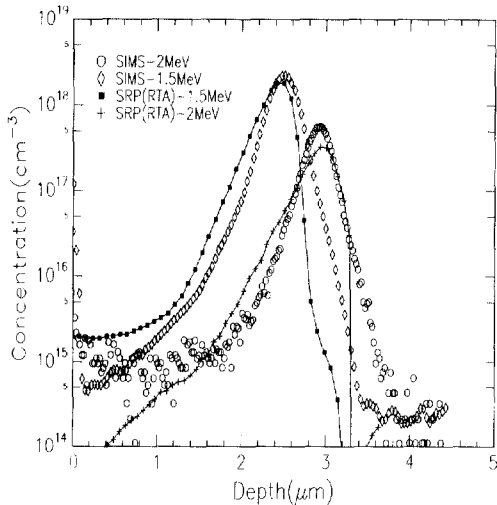


그림 10. 실리콘에서 SIMS와 SRP로 측정된 붕소 이온의 농도분포.

Fig. 10. Measured boron profiles by SIMS and SRP in silicon. ($E=1.5\text{MeV}$, $D=1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, $E=2\text{MeV}$, $D=2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$).

의 분포와 1000℃에서 10초간의 급온열처리(RTA) 후에 SRP로 측정된 데이터를 서로 비교하였다. P-N 접합깊이는 1.5 MeV와 2 MeV에서 각각 3.2 μm , 3.38 μm 를 나타내었다.

표 6, 7, 8은 그림 9와 10에서 나타난 붕소이온의 분포의 모멘트값을 계산하여 TRIM, SRIM등의 시뮬레이션의 결과치와 서로 비교하였다.

SRIM은 SIMS 데이터보다 최대농도의 위치가 표면쪽으로 더 이동되는 결과를 나타내었다. 이러한 이유는 전자정지력을 너무 큰 값으로 설정하였기

표 6. 실리콘에서 1 MeV로 ^{11}B 이온의 이온주입 후에 SIMS와 SRP로 측정된 데이터와 SRIM, TRIM 시뮬레이션의 계산 결과.

Table 6. Calculation results from SIMS, SRP and SRIM, TRIM data by ^{11}B ion implantation at energy of 1 MeV in silicon.

Type	R_p (μm)	ΔR_p (μm)	γ	β
TRIM	1.8003	0.1577	-2.26	12.26
SRP	1.797	0.218	-2.13	10.56
SIMS	1.882	0.1879	-2.18	10.2
SRIM	1.68	0.151	-2.369	13.957

표 7. 실리콘에서 1.5 MeV로 ^{11}B 이온의 이온주입 후에 SIMS와 SRP로 측정된 데이터와 SRIM, TRIM 시뮬레이션의 계산 결과

Table 7. Calculation results from SIMS, SRP and SRIM, TRIM data by ^{11}B ion implantation at energy of 1.5 MeV in silicon.

Type	R_p (μm)	ΔR_p (μm)	γ	β
TRIM	2.314	0.173	-2.92	21.75
SRP	2.379	0.2349	-2.66	16.9
SIMS	2.428	0.229	-2.59	29.66
SRIM	2.19	0.1594	-2.71	18.71

때문으로 사료된다. 전자정지력의 적절한 값으로 조정하여 정확한 이온의 분포를 나타낼 수 있다고 사료된다. SRP는 1000°C에서 10초간 열처리후에 측정된 데이터로 ΔR_p 의 값은 확산효과에 의하여 다소 SIMS 측정치보다 크게 나타남을 알 수 있다.

표 8. 실리콘에서 2 MeV로 ^{11}B 이온의 이온주입 후에 SIMS와 SRP로 측정된 데이터와 SRIM, TRIM 시뮬레이션의 계산 결과.

Table 8. Calculation results from SIMS, SRP and SRIM, TRIM data by ^{11}B ion implantation at energy of 2 MeV in silicon.

Type	R_p (μm)	ΔR_p (μm)	γ	β
TRIM	2.795	0.1799	-3.14	24.08
SRP	2.788	0.264	-2.0	11.56
SIMS	2.857	0.2194	-5.45	41.02
SRIM	2.69	0.1683	-3.239	26.81

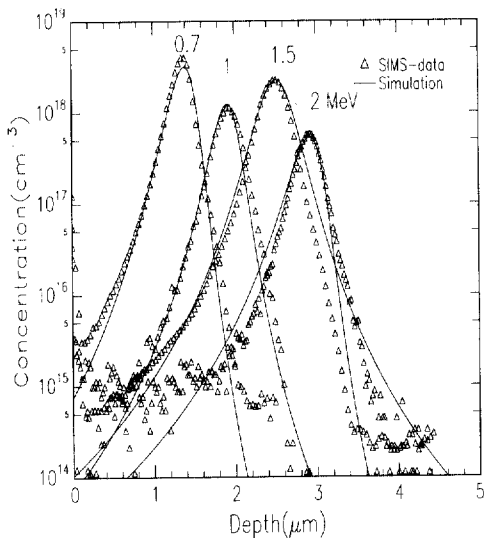


그림 11. 실리콘에 0.7 MeV에서 2 MeV로 이온주입된 붕소이온의 SIMS와 시뮬레이션된 농도분포.

Fig. 11. Boron profiles by SIMS and simulation in silicon ($E=0.7\text{MeV} \sim 2 \text{ MeV}$).

그림 11은 붕소이온을 0.7 MeV에서 2 MeV의 에너지영역에서 실리콘에 이온주입 후에 측정된 SIMS와 단지 네 개의 모멘트만을 사용하여 Pearson함수에 적용하여 재구성한 이온의 분포를 서로 비교하였다. 붕소이온의 분포는 비대칭분포를 나타내기 때문에 단지 네 개의 변수로 SIMS로 측정된 이온분포와 일치시키는 것이 어려운 일이나 본 논문에서는 Pearson함수에 적용하여 네개의 모멘트값으로 표 9에 나타내었다. 여기서 무게중심의 위치가 왼쪽으로 치우쳐 있기 때문에 음의 값을 나타내고 있고 에너지가 증가함에 따라서 붕소이온의 농도분포가 최대농도부근에서 점차적으로 뾰족해짐을 β 값의 크기로 확인할 수 있었다.

이온분포의 변위는 전자정지력의 수정을 통해서 나타난다. 그림2에 나타내었듯이 500keV 이상의 에너지에서는 핵정지력에 비해서 전자정지력이 지배적임을 알 수 있다. 전자정지력을 수정하여 SIMS 데이터와 잘 일치하는 붕소이온분포를 나타내었다. 그림 12에서는 가장 최근의 SRIM프로그램과 TRIM프로그램의 소스코드에서 전자정지력을 수정하여 SIMS 데이터와 비교하였다. 2 MeV의 에너지에서 SRIM의 전자정지력은 98.56 eV/Å 이고 핵정지력은 0.3344 eV/Å를 나타내었다.

TRIM 소스프로그램으로 부터 수정된 전자정지력을 적용시킨 경우에 나타난 결과를 SRIM과 SIMS 데이터와 비교하여 그림 12에 나타내었다.

표 9. 그림11의 붕소이온의 SIMS 데이터와 일치시키기 위해서 발췌된 4개의 모멘트.

Table 9. Extracted moments for SIMS data by ^{11}B ion implantation in Fig. 11 ($E= 0.7 \sim 2 \text{ MeV}$).

Energy (MeV)	Dose (cm^{-2})	R_p (μm)	ΔR_p (μm)	γ	β
0.7	1×10^{14}	1.342	0.159	-1.53	12.56
1	4×10^{13}	1.87	0.164	-1.53	30
1.5	1×10^{14}	2.50	0.23	-0.59	35
2	2×10^{13}	2.85	0.219	-3.0	80

수정된 TRIM에서는 전자정지력은 96.32 eV/Å 이고 핵정지력은 0.33 eV/Å를 나타내었다. 핵정지력은 별 차이가 없거나 전자정지력은 약간의 차이를 나타내었다. 따라서 SIMS 데이터와 완벽하게 일치하는 결과를 그림 2에서 나타난 것 처럼 확인할 수 있었다. 그림 12에서 나타난 모멘트값은 표 10에 나타내었다. 표10에서 나타난 것 처럼 R_p 의

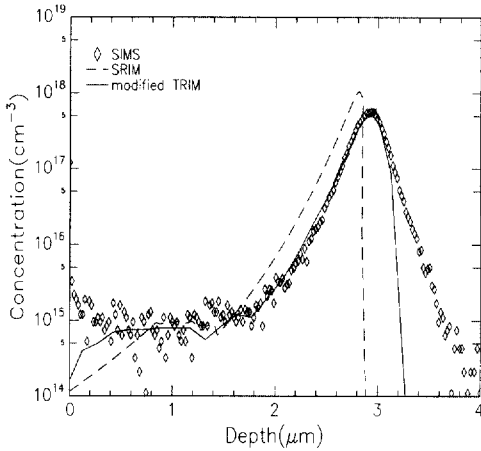


그림 12. 실리콘에서 SIMS로 측정된 붕소이온의 농도분포와 시뮬레이션 데이터와의 비교.

Fig. 12. Comparisons of boron profiles by SIMS and simulation results ($E=2\text{MeV}$, $D=1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$).

표 10. 실리콘에서 2 MeV로 ^{11}B 이온의 이온주입 후에 SIMS와 SRP로 측정된 데이터와 SRIM, TRIM 시뮬레이션의 계산 결과.

Table 10. Calculation results from SIMS and SRIM, modified TRIM data by ^{11}B ion implantation at energy of 2 MeV in silicon.

Type	$R_p(\mu\text{m})$	$\Delta R_p(\mu\text{m})$	γ	β
SIMS	2.857	0.2194	-5.45	41.02
SRIM	2.69	0.167	-3.163	25.51
modified TRIM	2.843	0.1844	-2.9	21.70

값이 SIMS와 수정된 TRIM의 결과는 매우 잘 일치하는 반면에, SRIM은 다소 작은 값을 나타내어 프로파일의 최대농도의 위치가 표면쪽으로 변위된 형태를 나타내고 있음을 그림 12를 통하여 확인할 수 있었다.

그림 12에서 처럼 modified TRIM, SRIM은 모두 다 비정질기판에 붕소이온주입모의실험 결과임으로 항상 채널링꼬리 부분이 가파르게 떨어지는 이온의 분포를 나타낸다. 채널링효과를 고려해야만 이온분포의 꼬리부분을 완벽하게 일치시킬 수 있다. 현재까지 채널링을 완벽하게 설명하는 물리적인 모델은 없다. 따라서 본 논문에서는 제시한 바와 같이 Pearson함수에 적용시켜 프로파일의 꼬리부분을 적용시켜서 단결정실리콘에서의 이온의 프로파일을 재구성하는 방법을 나타내었다. 그러나 본 논문에서 수정된 TRIM의 결과는 채널링부분을 제외하고는 SIMS 데이터와 완벽하게 일치함을 나타내었다. 따라서 수정된 전자정지력은 수식 15로 나타내었다. 이 수식은 1~5 MeV의 에너지영역에서 실험 데이터와 잘 일치하여 적용이 가능하다. 수식(15)에서 에너지 E는 keV에 해당한다.

$$S_e(E) = 25 \times E^{0.2} - 0.009 \times E(eV/\text{Å}) \quad (15)$$

4. 결론

현재 반도체소재제작자들은 고에너지이온주입 공정기술을 CMOS집적회로등 여러분야에 다양하게 적용하고 있다. 본 논문에서는 붕소의 동위원소 ^{10}B 과 ^{11}B 를 이온주입하여 SIMS로 측정하여 본 결과 이온의 분포를 전자정지력과의 관계를 통하여 모멘트와의 관계를 구체적으로 비교분석하였다. 그 결과 ^{11}B 이온이 ^{10}B 보다 다소 더 깊은 분포를 나타내었다. 이 이유는 가벼운 ^{10}B 이 더 높은 전자정지력에 빨리 도달하기 때문에 이온의 침투깊이가 ^{11}B 에 비해서 상대적으로 작게 나타나고 있기 때문이다. SRIM이 TRIM보다 다소 전자정지력 값을 크게 조정하였지만 그림에도 불구하고 전자정지력의 수정을 통하여 개선된 이온분포를 나타낼 수 있었다. 붕소의 고에너지이온주입후에 SIMS 측정을 통하여 나타난 농도분포는 에너지가 크짐에 따라서 표면에서 반사현상을 나타내어서 길게 늘어진 형태의 분포가 최대 농도분포의 위치까지 나타나며, 이러한 현상 때문에 가우스분포처럼 무게중심이 중간의 위치에 놓여있지 않고 피크농도

위치에서 왼쪽으로 치우쳐진 위치에 놓이게 된다. 따라서 세 번째 모멘트값은 음의 값을 나타내고 있다. 또한 에너지가 크짐에 따라서 네 번째 모멘트는 더 큰 값을 나타내었다. 따라서 이온의 분포가 피크농도분포에서 더 뾰족하게 나타나고 있음을 확인하였다. 본 논문에서는 SIMS와 SRP의 측정데이터로부터 모멘트를 계산하여 컴퓨터 시뮬레이션의 결과와 서로 비교하여 계산된 결과를 검증할 수 있었다. 고에너지에서 핵정지력은 TRIM과 SRIM에서 별 차이점이 없음을 확인할 수 있었다. 반면에 전자정지력은 이온분포의 변위를 나타내는 결정적인 요인이됨을 확인하였다. 전기적인 활성화를 위해서 본 논문에서 붕소 1 MeV의 이온주입후에 950℃에서 30분간 질소가스 분위기에서 전기로를 사용하여 열처리한 경우는 1000℃에서 10초간 질소가스 분위기에서 급온열처리한 경우 보다 더 많은 확산효과를 나타내었다. 또한 SRP의 측정결과를 통하여 본 결과 전기로열처리한 경우에서 p-n 접합깊이가 더 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제시한 모멘트의 계산방법, 전자 및 핵정지력을 수정한 사정거리의 계산방법은 이온의 농도분포를 최적화하여 재구성할 수가 있었다. 이러한 방법은 이온분포계산에서 더 개선된 결과를 얻을 수 있다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2000학년도 경기대학교 학술연구비(일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었음.

참고 문헌

[1] H. H. Andersen and J. F. Ziegler, "Hydrogen, Stopping Power and Ranges in all Elements", The Stopping and Ranges of Ions in Matter edited by J. F. Ziegler, Pergamon, New York, Vol. 3, 1977.
 [2] U. Littmark and J. F. Ziegler, "Handbook of Range Distributions for Energetic Ions in all Elements", The Stopping and Ranges of ions in Matter edited by J. F. Ziegler, Pergamon, New York, Vol. 6, 1980.
 [3] S. A. Campbell, "The Science & Engineering of Microelectronic Fabrication", Oxford University Press, 2nd ed., 2001.
 [4] C. Y. Chang and S. M. Sze, "ULSI Devices",

John Wiley and Sons, 2000.
 [5] Hong Xiao, "Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology", Prentice Hall, 2001.
 [6] James D. Plummer, Michael D. Deal, and Peter B. Griffin, "Silicon VLSI Technology", Prentice Hall, 2000.
 [7] D. Widmann, H. Mader, and H. Friedrich "Technologie Hochintegrierter Schaltungen", Springer, 1996
 [8] 정원채, "실리콘에 MeV로 이온주입된 인의 결함분포와 profile에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 10권, 9호, p. 881, 1997.
 [9] 정원채, "비정질실리콘에 인의도핑과 이온주입에 따른 농도분포에 대한 연구", 전기전자재료학회논문지, 12권, 1호, p. 18, 1999.
 [10] 안병목, 정원채, "JBS 정류기의 PN접합구조에 따른 I-V 특성에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 13권, 1호, p. 20, 2000.
 [11] J. P. Biersack and L. G. Haggmark, "A monte carlo computer program for the transport of energetic ions in amorphous targets", Nucl. Inst. Meth., Vol. 174, No. 2. p. 257, 1980.
 [12] W. Eckstein, "Computer Simulation of Ion-Solid Interactions", Springer-Verlag, 1991.
 [13] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and U. Littmark, "The Stopping and Range of Ions in Solids", Pergamon Press, New York, 1996.
 [14] J. F. Ziegler, "The stopping of energetic light ions in elemental matter", J. Appl. Phys., Vol. 85, No. 3, p. 1249, 1999.
 [15] J. F. Ziegler and J. M. Manoyan, "The stopping of ions compounds", Nucl. Inst. Meth., B35, Vol. 2, No. 1, p. 215, 1988.
 [16] J. F. Ziegler, "SRIM 2000 manual", <http://www.srim.org/>
 [17] H. Ryssel, J. Lorenz, and W. Krüger, "Ion implantation into non-planar targets: monte carlo simulations and analytical models", Nucl. Inst. Meth., B19/20, Vol. 2, No. 3, p. 45, 1987.
 [18] User's Guide "ICECREM 1996 manual", Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS-B) Schottky St. 10 Erlangen Germany.