

실리콘에 MeV로 이온주입된 As 와 Sb의 profile과 열처리에 의한 이온의 거동에 관한 연구

(A Study of Profiles and annealing behavior of As and Sb by MeV implantation in silicon)

鄭遠采 *

(Won-Chae Jung)

요 약

본 연구에서는 heavy ions (As, Sb) 를 Si 기판에 1~10 MeV의 에너지 영역으로 이온주입을 실행하였다. 이온 주입된 As, Sb 이온들의 profiles를 TRIM simulation과 하나의 피어슨 함수를 이용한 분석적인 묘사방법 (Analytical description methods using one Pearson function) 을 통한 simulation의 결과들 서로 비교 하였다. 이 결과 As로 주입된 profile은 TRIM-profile 과 약간의 편차(deviation)가 있었으나, Sb이 주입된 경우는 TRIM-profile 과 잘 일치 하였으며, 단지 하나의 피어슨함수 (one Pearson function)를 이용한 경우는 Sb의 모든 경우에 있어서 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 As의 경우는 channeling 효과 때문에 SIMS profile과 약간의 편차가 있었다. 주입된 이온의 전기적인 활성화를 위해서 열처리는 노열처리와 급온열처리(RTA)로 수행되었다. 열처리후에 농도-깊이 profile은 SR(Spreading Resistance) 방법에 의해서 측정되었다.

Abstract

This study demonstrates the profiles of heavy ions (As, Sb) in silicon by high energy (1~10 MeV) implantation. Implanted profiles were measured by SIMS (Cameca 4f) and compared with simulation results (TRIM program and analytical description method using Pearson functions). The experimental results have a little bit deviation with simulation data in the case of As high energy implantation. But in the case of Sb, the experimental results are in good agreement with TRIM data. SIMS profiles are perfectly fitted with a analytical description method only using one Pearson function in Sb implantation. But in the case of As, fitted profiles show with a little bit deviations by channeling effects of SIMS profiles. Thermal annealing for electrical activation of implanted ions was carried out by furnace annealing and RTA(Rapid Thermal Annealing). Concentration-depth profiles after heat treatment were measured by SR(Spreading Resistance) method.

I. 서 론

고에너지(MeV) 이온주입 기술은 고집적회로의 반

도체 소자제작 공정에 사용되는데 이에 대한 연구가 신뢰성있는 고에너지 이온 주입장치의 개발로 말미암아 80년대 후반 이후 부터 활발히 진행되고 있다^[1,2]. 고에너지 이온 주입기술은 집적회로에서 retrograde well^[3,4], 매립층(buried layer)^[5], material modification^[6,7,8] 등 여러분야에 응용이 되고있다. 그러나 기초연구 (fundmental research)는 비교적 많이

* 正會員, 京畿大學校 電子工學科

(Department of Electronic Engineering, Kyonggi University)

接受日字:1997年7月23日, 수정완료일:1998年3月2日

수행되지 못한 것은 사실이다. 주입된 이온의 분포를 정확히 이해하는 것은 소자제작시 중요한 요건이 된다. 따라서 본 연구에서는 SIMS로 측정된 profile 과 TRIM simulation^[9,10]을 통하여 얻은 profile을 서로 비교하였으며 분석적인 방법(analytical description method)으로서 one Pearson function을 이용한 방법을 처음으로 제시하였다. 마지막으로 주입된 이온의 전기적인 활성화를 위해서 열처리공정이 행해지는데, 노 열처리 와 굽은 열처리에 의하여 실행되었고, 열처리후의 농도-깊이 profile은 SR(spreading resistance) 방법^[11]에 의해서 측정되었다. 고에너지 영역에서 열처리후의 측정된 As 와 Sb의 profile의 실험 결과는 본 논문에서 처음으로 자세히 나타내었다. 이온주입된 이온의 분포는 4개의 parameter로서 profile을 구성할 수 가 있는데, 깊이에 따른 농도는 식(1)로 나타내어진다.

$$C(x) = N_{\square} \cdot f(x) \tag{1}$$

여기서 N_{\square} 는 주입된 이온의 dose량을 나타내고 $c(x)$ 는 깊이에 따른 농도를 의미하며, $f(x)$ 는 normalized distribution function이다.

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

첫 번째 moment로서 수직으로 입사된 이온의 평균 range는 식(3)으로 나타내어진다.

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

두 번째 moment로서 standard deviation(ΔR_p)는 식(4)로 나타내어진다.

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

세 번째 moment로서 skewness(γ)는 profile의 무게중심의 이동을 나타내며 식(5)에 나타내었다. γ 가 양의 값이면 오른쪽으로 음의값을 가지면 왼쪽으로 무게중심이 각각 이동하는 정도를 나타낸다.

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

네 번째 moment로서 kurtosis(β)는 profile의 sharp한 정도를 나타내며 식(6)에 나타내었다. β 의

값이 크면 profile의 형태가 sharp 하게되고 β 의 값이 작아지면 profile이 peak concentration 영역에서 완만한 형태를 나타내게된다.

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

주입된 이온의 분포는 일반적으로 두 개의 moment를 가진 symmetrical한

형태의 gaussian distribution function으로 다음의 식(7)로 나타내어진다.

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

만약 profile의 형태가 asymmetrical한 형태를 나타내게 되면 gauss 분포함수로 profile의 형태를 묘사할 수 가 없게된다. 이 경우 3, 4 번째의 moment를 가진 Pearson 함수를 이용함으로서 실험 data를 fit시키는 것이 더 적합하다. Pearson 분포의 함수들은 식(8)의 해로서 나타내게 되는데, 분포함수 $f(x)$ 에 대한 미분방정식은 식(8)과 같다.

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

여기서 a, b₀, b₁, b₂, 는 다음의 식들로서 나타내어진다.

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

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

$$b_1 = a \tag{11}$$

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

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

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

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

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

II. 실험

본 연구에서는 반도체에서 불순물 doping element 로 자주 사용되는 As, Sb 이온들을 (100)의 방향성을 가지는 p type 실리콘 기판에 Genus Ionex Tandem 장치를 이용하여 주입 하였다. 이때에 실리 콘 기판의 비저항은 4 ~ 5 $\Omega \cdot \text{cm}$ 이었다. 주입된 에너지 영역은 1 ~ 10 MeV 로 이온 source에 가스 이온 source 형태가 아닌 고체(solid) 이온 source 가 사용 되었는데, 이 방법은 SIMS(Secondary Ion Mass Spectroscopy)의 원리와 마찬가지로 Cs reservoir 에서 이온화된 Cs이온이 가속전압 4-6 kV 로 이온 source target에 부딪치면 +, - 와 중성을 띤 atom들이 생기게 되는데, 이때 단지 작은 slot을 통해서 negative 이온만이 extraction 되어진다. 이때 extraction voltage 는 20 kV 이다. 그 다음 mass separation magnet 까지 40 kV로 가속되어진다. 첫 번째 magnet는 질량 분석을 위해서 사용되어진다. 가속탱크안의 vacuum은 약 10^{-7} Torr 이고 가속기의 전극부분과 탱크벽면을 절연시키기 위해서 SF₆ 가스가 채워져있다. Mass separation 이후에 extraction 된 negative 이온은 terminal 전압으로 가속되어 Tandem 가속기의 원리에 의해서 탱크의 중앙부분까지 가속된다. 이때에 stripper-gas 로서 사용된 N₂ 가스에 부딪치게 되면 외각 전자를 떼어내게(strip) 된다. 이때에 negative 이온이 positive 이온으로 변화게된다. positive 이온은 반발력에 의해서 다시 한번 더 가속되어진다. 가속후에 3개의 quadrupol을 통해서 집속(focus)이 되어진다. 집속된 이온은 두번째 magnet 를 통하여 charge state(전하상태)를 결정하게 된다. 그 이후 가속된 이온은 target chamber에 도달하게 된다. 본 실험에 사용된 MeV 장치는 그림 1에 나타내었다.

따라서 최종적인 에너지는 다음과 같은 수식에 의해서 구해진다.

$$E_{\text{tot}} = e [U_{\text{inj}} + (1 + n)V_T] \quad (15)$$

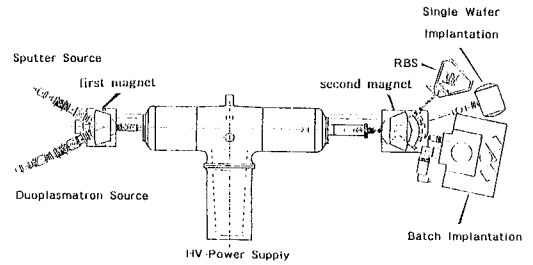


그림 1. 실험에 사용된 MeV 이온 주입장치의 개략도

Fig. 1. Schematic diagram of the MeV ion implanter used in experiments.

여기서 U_{inj} (injection voltage) = 60 kV, e = elemental charge, n = charge state, V_T = terminal voltage 이다. SIMS 측정시 sputtering yield를 좋게 하기위해서 As, Sb의 이온들이 주입된 경우는 primary ion 으로 Cs을 이용하였다. Sputter후에 crater 경계에 의한 효과가 profile의 quality에 영향을 주기때문에 우선 넓게 주사(raster)한 후에 주사면적을 매우 작게 하였고 crater의 깊이를 정확하게 측정하기 위해서 Dektak-profilometer가 사용되었다. 고에너지로 주입된 이온의 profile의 경우는 SIMS 측정시 야기된 소위 knock on 효과를 무시 할 수 있다. 주입된 이온들의 전기적인 활성화를 위해서 열처리가 수행되는데 profile의 형태가 가급적 그대로 유지하기 위해서 확산효과가 적게 나타나는 급온 열처리(RTA)가 일반적인 노(furnace) 열처리보다 더 유리하기 때문에 RTA 방법이 자주 이용 되고있다. Sb의 열처리 시 산소 분위기에서와 inert gas인 질소 분위기에서 각각 온도 1000°C에서 30분간씩 노 열처리에서 하였다. As의 경우는 RTA 방법을 이용하여 1000°C, 10 초동안 열처리 하였다. 그 다음 전기적으로 활성화된 캐리어의 분포를 얻기위해서 질소가스 분위기와 산소 분위기에서 열처리한후 SR(Spreading Resistance)측정을 통하여 profile을 서로 비교하였다.

III. 결과 및 고찰

1. TRIM data

TRIM(Transport of Ions in Matter) program [9]은 주입된 이온이 target atom과 binary nuclear collision(이진핵충돌)에 의해서 simulation(모의공정 실험)이 실행된다. 충돌변수(impact parameter) P 와

이온의 에너지 변화와 여러방향의 방위각(azimuth angle) θ 에 의해서 계산이 실행된다. 충돌사이의 경로 λ 는 일직선으로 가정한다^[9]. Inelastic stopping (비탄성적인 정지) 작용은 이온들의 운동에너지를 고려하여 충돌변수(impact parameter) P에 종속이거나 독립적인 에너지손실에 기인한다. 이온의 simulation은 target의 밖으로 이온의 위치가 나타나거나, 이온의 운동에너지가 사전에 규정된 경계값 E_f (final energy)보다 작을때 계산을 종료하게된다. Nuclear stopping power(핵 정지력)은 ZBL(Ziegler Bier-sack Littmark)의 universal potential에 의해서 계산되고, electronic stopping power(전자 정지력)은 ZBL(Ziegler Biersack Littmark)의 모든 target에서 semiempirical 한 형태로 나타난 계산식에 의해서 구해진다^[9]. TRIM program을 이용한 computer simulation은 단결정이 아닌 비정질 기관에서의 불순물 농도-깊이 분포를 나타낼 수 있다. 그러나 실제적으로는 단결정에 주입된 이온들은 거의 channeling tail을 나타내고 있다. 이러한 이유때문에 이온주입시 channeling 효과를 억제하기 위해서 보통 7°의 각도로 beam line을 tilting하여 사용되고 있다. 그럼에도 불구하고 이러한 channeling 효과는 dechanneling 효과에 의해서 다시금 원자들 사이로 channeling 효과가 나타난다.

2. As와 Sb의 SIMS data

a) Arsenic 이온주입: Arsenic(비소)은 CMOS 제작시 Phosphorus 의 경우보다 shallow junction, bipolar fabrication에 응용이 되고 있다. 이는 원자번호 33인 단지 하나의 isotope 인 질량 75 는 Boron(10, 11), P(31)의 경우보다 더 크기 때문에 penetration depth 가 훨씬 짧기 때문이다. 또한 peak concentration 영역부근은 넓은 형태로 As 이온이 분포된 profile을 나타내고 있다. 이 이유는 Boron, Phosphorus 의 이온주입 경우보다도 Arsenic 자체의 질량이 크기 때문에 nuclear collision (핵충돌)에 의한 더 큰 damage(손상) 영역을 나타내고 있기때문이다. As 이온의 mass가 높음에도 channeling 효과에 의한 channeling tail이 SIMS 측정을 통하여 나타남을 알 수 있었다.

b) Antimony 이온주입: Antimony(안티몬)는 질량이 121, 123 의 두개의 isotope을 가진 heavy 이

온인데 반도체소자 공정에서 매립층(buried layer)제작을 위해서 자주 사용되어진다. 또한 Sb 고에너지 이온주입으로 다층구조의 소자 제작도 가능하다. Sb 이온은 As 이온보다 mass가 더 크기 때문에 channeling 효과에 의한 channeling tail이 SIMS 측정후에 As의 경우보다 훨씬 더 적게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 이 경우 gauss 분포에 더 가까운 profile의 형태로 나타나게된다.

표 1. As 이온주입에서 SIMS data로부터 발췌된 moments와 TRIM data와의 비교
Table 1. Comparision between TRIM data and extracted moments from SIMS data of As ion implantation.

Energy(MeV)	TRIM and SIMS data	$R_p(\mu m)$	$\Delta R_p(\mu m)$	γ	β
1.0	TRIM	0.658	0.1645	-0.29	2.85
	SIMS	0.652	0.1873	0.17	3.96
2.0	TRIM	1.311	0.2650	-0.6	3.37
	SIMS	1.303	0.2655	-0.42	3.77
5.0	TRIM	2.809	0.3955	-1.04	4.87
	SIMS	2.683	0.4076	-0.72	4.56
6.06	TRIM	3.150	0.4323	-1.32	6.16
	SIMS	2.879	0.4145	-0.53	5.11
7.56	TRIM	3.410	0.3886	-1.28	6.12
	SIMS	3.278	0.4117	-0.77	5.24
8.6	TRIM	3.886	0.4783	-1.72	8.29
	SIMS	3.894	0.5050	-0.85	5.63

표 2. Sb 이온주입에서 SIMS data로부터 발췌된 moments와 TRIM data와의 비교
Table 2. Comparision between TRIM data and extracted moments from SIMS data of Sb ion implantation.

Energy(MeV)	TRIM and SIMS data	$R_p(\mu m)$	$\Delta R_p(\mu m)$	γ	β
1.0	TRIM	0.42	0.107	0.04	2.80
	SIMS	0.47	0.143	0.73	2.97
2.0	TRIM	0.86	0.192	-0.19	2.78
	SIMS	0.86	0.219	-0.24	3.23
3.0	TRIM	1.30	0.265	-0.32	2.97
	SIMS	1.25	0.352	-0.16	3.22
4.0	TRIM	1.73	0.327	-0.50	3.19
	SIMS	1.67	0.374	-0.33	3.39
5.0	TRIM	2.15	0.382	-0.62	3.41
	SIMS	2.03	0.492	-0.31	3.84
7.0	TRIM	2.96	0.463	-0.77	3.85
	SIMS	2.64	0.566	-0.52	4.46

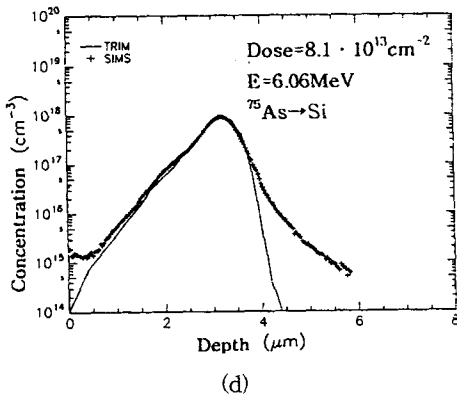
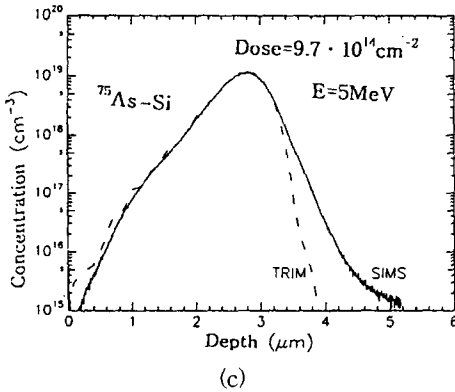
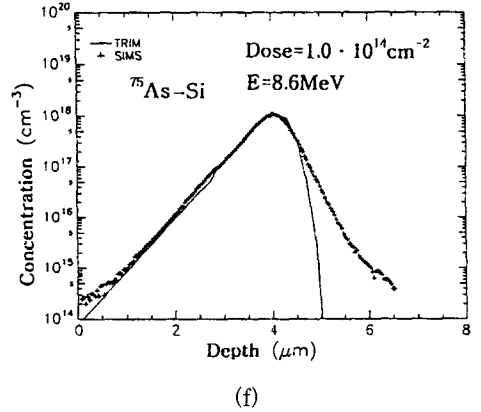
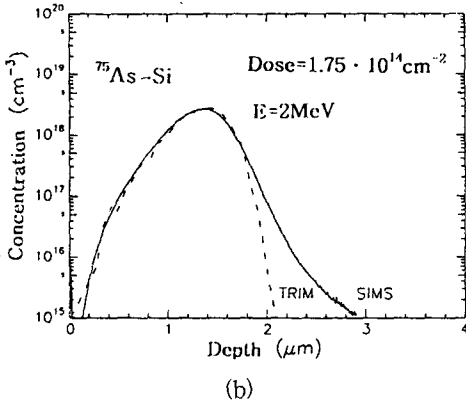
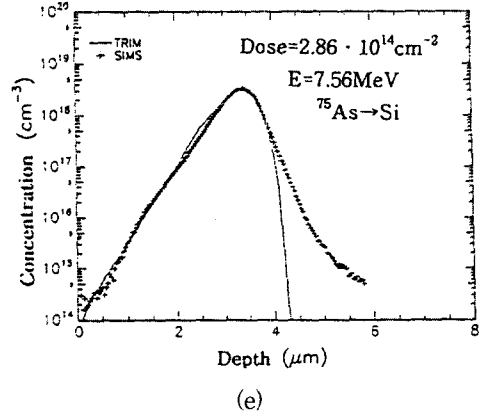
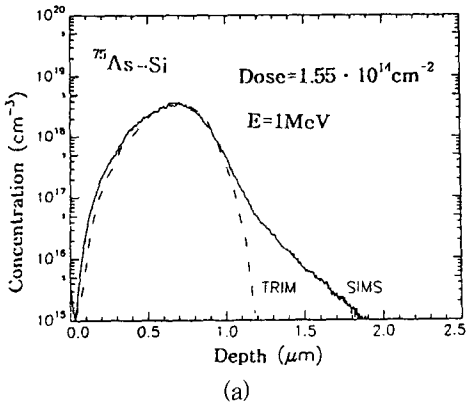
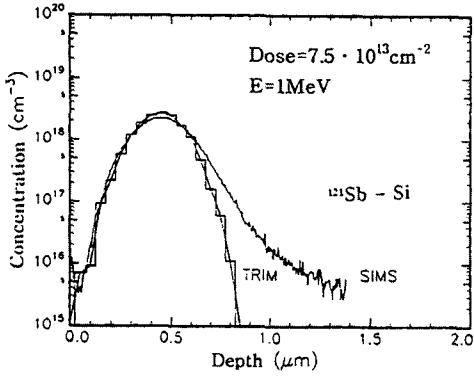


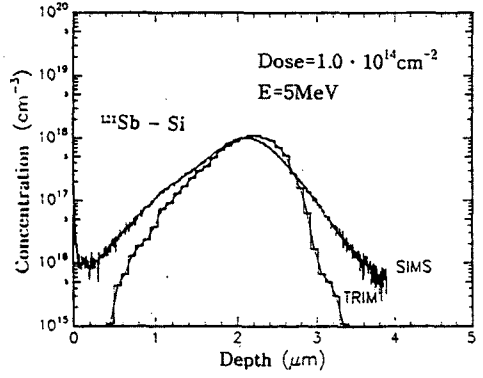
그림 2. 실리콘에 As가 주입된 SIMS-와 TRIM-profiles의 비교
 Fig. 2. Comparisons between SIMS- and TRIM-profiles for As implanted silicon.

3. 결과 및 고찰

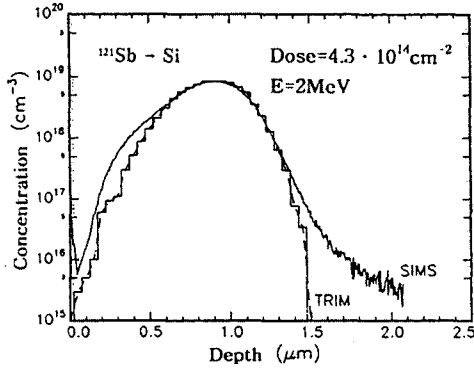
Reflection scattering이 나타나는 가벼운 B, P의 경우에는 표면에서 peak-concentration까지 길게 늘어선 등선을 나타내는 profile의 형태와는 달리 heavy ions인 As와 Sb은 forward scattering이 이온주입 동안에 지배적으로 일어나기 때문에 reflection scattering의 효과가 나타나지 않고 내부로 이온이 침투하여 gauss profile과 비슷한 형태로 나타나게된다. 그림 2 a에서 f는 실리콘 기판에 As 이온이 에너지영역 1~8.6 MeV로 이온주입된 경우의 SIMS와 TRIM의 profile을 서로 비교하여 나타내었다. 이 경우 SIMS data와 TRIM-code로 전산모사한 결과가 대체로 잘 맞는 편이었다. 그림 3 a에서 f는 실리콘 기판에 Sb 이온이 에너지영역 1-7 MeV로 이온주입된 경우의 SIMS와 TRIM의 profile을 서로 비교하여 나타내었다.



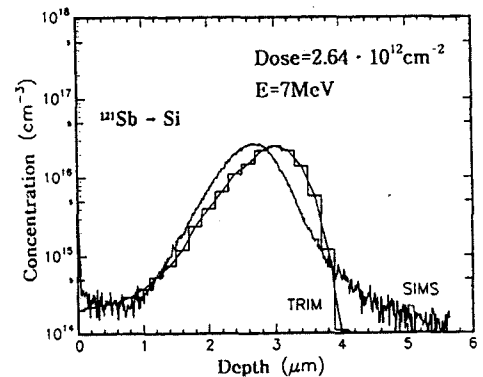
(a)



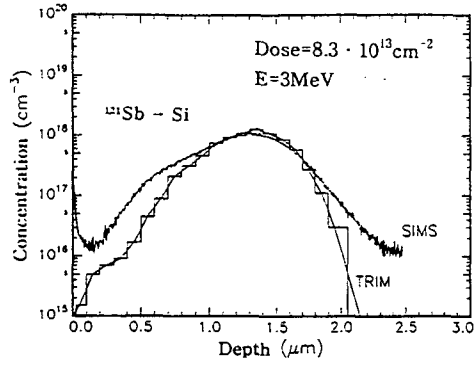
(e)



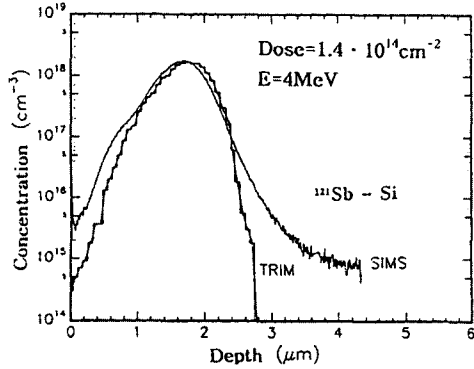
(b)



(f)



(c)



(d)

그림 3. 실리콘에 Sb가 주입된 SIMS-와 TRIM-profiles의 비교

Fig. 3. Comparisons between SIMS- and TRIM-profiles for Sb implanted silicon.

이 경우는 에너지가 5 MeV부터는 SIMS data와 TRIM-code로 전산모사한 결과가 약간의 편차를 나타내기 시작하여 에너지가 7 MeV에서는 그림 3. f에서 나타난 것 처럼 TRIM data가 SIMS data보다 더 깊이 shift하였음을 알 수 있었다. 이 이유는 5 MeV 이상의 고에너지 영역에서 전자정지력을 너무 약하게 계산하였기 때문이라고 생각된다. Sb의 경우 5 MeV 이상에서 TRIM 결과의 range가 더욱 깊게 나오는 것은 electronic stopping power를 TRIM이 너무 약하게 계산하였기 때문이라고 하였는데 그렇다면 As의 경우 5 MeV 이상에서도 전산 모사치가 대체적으로 잘 맞는 이유는 As은 mass가 75인데 반해서 Sb은 mass가 121이므로 두 elements사이의 mass difference가 큰 편이다. 이 문제는 interatomic potential과 electronic stopping power의 두 관계를 동시에 고려해서 설명되어야 하는데, 아마도

As의 경우보다 더 큰 mass(75~100)인 경우는 ZBL(Ziegler Biersack Littmark)의 이론이 대체로 잘 맞는 편이지만 더 큰 경우 MeV의 에너지 영역에서는 더 큰 편차가 나타나리라고 추정된다. 이 문제는 TRIM source-code를 modify하여 실험 data와 비교함으로써 계속 연구되어야 할 과제로 추후 mass가 서로 다른 elements를 이온주입한 실험 data와의 비교가 되어야 된다고 예상된다.

2. SIMS data와 simulation with one Pearson function

처음으로 단지 4개의 변수(parameter)만으로 측정된 profile을 analytical 한 방법으로 fit 시켰다. 하나의 Pearson 함수는, R_p , ΔR_p , γ , β 에 의하여 결정되는데 [수식 3, 4, 5, 6 참조], 대체적으로 고에너지로 주입된 profile은 SIMS 측정후에 주로 Pearson I, IV, VI의 함수형태로 나타난다. Fitted profiles의 peak concentration의 위치와 높이는 단지 주입된 이온의 가속에너지와 이온 dose량에 의해서 결정되어진다. table 3 과 4는 ICECREM simulation^[12]을 통하여 발췌한 parameter들이고 발췌된 이 parameter들을 가지고 profile을 재구성한 것이 그림 4 와 5에 나타내었다.

표 3. As 주입의 발췌된 moments

Table 3. Extracted moments [one Pearson function=4 parameters] of As implantation.

Energy(MeV)	Dose(cm ⁻²)	R _p (μm)	ΔR _p (μm)	γ	β
1.0	1.55×10 ¹⁴	0.6296	0.2018	0.348	3.77
2.0	1.75×10 ¹⁴	1.3023	0.2853	-1.640	3.89
5.0	9.7×10 ¹⁴	2.720	0.4098	-0.880	5.33
8.6	1.0×10 ¹⁴	3.920	0.5253	-1.030	9.12

표 4. Sb 주입의 발췌된 moments

Table 4. Extracted moments [one Pearson function=4 parameters] of Sb implantation.

Energy(MeV)	Dose(cm ⁻²)	R _p (μm)	ΔR _p (μm)	γ	β
1.0	3.33×10 ¹⁵	0.47	0.143	0.393	3.96
2.0	5.20×10 ¹⁵	0.86	0.219	0.096	4.03
3.0	7.90×10 ¹⁵	1.25	0.352	-0.142	4.17
5.0	1.0×10 ¹⁴	2.03	0.492	-0.442	4.67

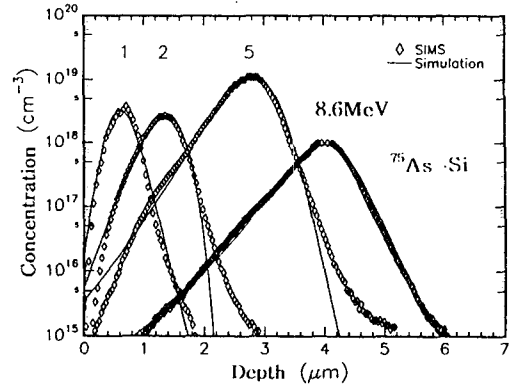


그림 4. 실리콘에 주입된 As에 대한 SIMS-profiles 과 4개의 moments를 가진 simulation-profiles와의 비교

Fig. 4. Comparisons between SIMS- and simulation-profiles with 4 moments for As implanted in silicon.

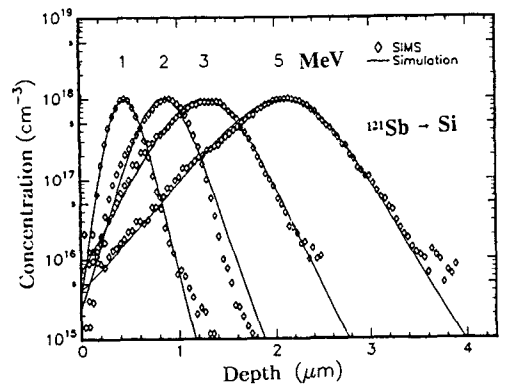


그림 5. 실리콘에 주입된 Sb에 대한 SIMS-profiles 과 4개의 moments를 가진 simulation-profiles와의 비교

Fig. 5. Comparisons between SIMS- and simulation-profiles with 4 moments for Sb implanted silicon.

3. As와 Sb 이온이 주입된 분포와 열처리후의 확산 효과에 의한 이온의 재분포

주입된 이온의 전기적인 활성화를 위해서 열처리가 행하여지는데 일반적으로 텅스텐 할로겐 램프를 사용한 급속 열처리(RTA)와 노 열처리(furnace annealing) 과정이 실행된다. 본 실험에서는 RTA 경우 1000℃에서 10초간 불활성가스인 N₂ 분위기에서 As 이온주입된 sample을 열처리 하였으며(그림 6 참조), Sb 이온주입된 sample들은 furnace 열처리로 100

0°C에서 30분간 O₂ 와 N₂ 가스 분위기에서 열처리 되었다.(그림 7, 8, 9 참조) 이온의 dose가 10¹⁵ cm⁻² 보다 적으면 가급적 확산효과를 줄이고 거의 100% 가까이 전기적인 활성화를 위해서 온도가 1000°C 이면 충분하다. 대량생산을 위해서 흔히 furnace 열처리가 행해진다. 이 경우는 RTA 보다 더 긴시간의 열처리 cycle 때문에 더 많은 확산효과가 나타난다. 주입된 이온이 전기적으로 어느정도 활성화 한가의 척도는 carrier의 electrical activation 정도를 통하여 알 수 있는데, 아래의 식(16)에 나타내었다.

$$Electrical\ activation(\%) = \frac{\text{측정된 전체농도 (SR)}}{\text{측정된 전체농도 (SIMS)}} \times 100 \quad (16)$$

여기서 전체농도는 거리에 따른 농도의 적분을 의미한다. 주입된 이온의 전기적인 활성화의 정도를 알기 위해서는 SIMS, SR의 측정방법을 통해서 식(16)으로 계산할 수가 있다. O₂ 가스분위기에서 열처리한 경우 As의 경우는 B, P의 경우처럼 OED 효과가 나타난 반면에 Sb의 경우는 ORD가 나타난다고 저에너지 이온주입의 실험 결과에 나타나있다^[11]. OED(Oxygen Enhanced Diffusion)은 O₂ 가스분위기에서 열처리한 경우 surface oxidation은 As의 enhanced diffusion을 유도한다. 이때에 SiO₂/Si 계면에서 point defect가 격자면 사이에서 야기 되어서 Si층으로 이동하게 되기 때문이다. 따라서 supersaturation (C_i > C_i^{eq})에서 self interstitial은 oxidation-induced stacking faults와 enhanced diffusion을 일으킨다. 여기서 C_i, C_i^{eq}는 각각 self interstitials의 concentration 및 thermal equilibrium concentration이다. ORD (Oxygen Retard Diffusion) 는 O₂ 가스분위기에서 열처리한 경우 SiO₂/Si 계면에서 oxide가 growing됨에 따라서 Si 속으로 주입된 self-interstitials이 self-interstitials와 vacancies가 재결합 함으로서 다음의 식으로 설명되어진다. I + V ⇌ O, 여기서 O는 undistributed lattice, I는 self-interstitials, V는 vacancies를 나타낸다. Sb는 주로 vacancy mechanism에 의해서 이동하기 때문에 vacancy under-saturation(C_i < C_i^{eq})은 retard diffusion을 나타내게 된다. 그러나 고에너지 주입에서 As 와 Sb의 경우 열처리후의 data는 아직도 부족한 실정이다. 특히 3 MeV 이상의 에너지영역에서의 실험 data는 잘 나타나있지 않은 편이다.

As 이온주입후 RTA로 열처리후에 SRP의 data는 Fig. 6과 Table 5에 잘 나타나있다. 여기서 1000°C, 10초동안 RTA 열처리후 1 MeV에서 5.31 MeV 까지의 에너지 영역에서 junction depth를 나타내고 있다. 그림 7, 8, 9는 Sb을 1, 2, 5 MeV로 이온주입한 후 furnace 열처리를 한후에 SR로 측정하여 SIMS와 TRIM data를 서로 비교하였다. 이 경우 그림 7, 8, 9에서 나타난 것 처럼 O₂ 가스분위기에서 열처리한 경우에 junction depth가 inert gas인 N₂ 가스분위기에서 열처리한 경우보다 더 작게 나타나 있기 때문에 Sb 이온주입후 열처리하면 ORD효과가 나타남을 알 수 있었다.(그림 7, 8, 9 참조) 그림 7, 8, 9에서 inert(N₂)는 질소분위기에서, oxidation은 산소분위기에서 각각 1000°C에서 30분간 열처리한 data를 나타낸다.

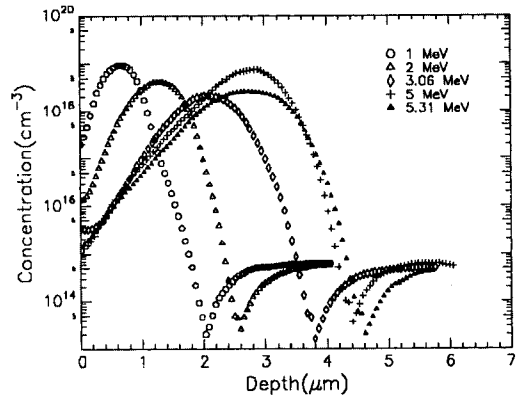


그림 6. As 이온주입후의 SRP
Fig. 6. SRP(Spreading Resistance Profiles) after As ion implantaion.

표 5. As 이온주입후에 SR측정에 의해 결정된 접합깊이

Table 5. Junction depth determined by spreading resistance measurements after As ion implantaion.

Energy (MeV)	Dose (cm ⁻²)	Junction depth (μm)
1	1.55×10 ¹⁴	2.051
2	1.75×10 ¹⁴	2.545
3.06	8.9×10 ¹³	3.739
5	9.7×10 ¹⁴	4.358
5.31	2.78×10 ¹⁴	4.621

Sb의 경우 Sb⁶⁺까지 As의 경우 charge state가

As⁺⁵까지의 charge state를 본 실험에서 사용된 MeV 장치를 통하여 이온주입할 수 있었다. 그림 7, 8, 9에서 나타난 Sb의 이온주입된 조건은 terminal voltage가 각각 314, 647, 1235 kV 이었으며, charge state는 각각 Sb⁺⁺, Sb⁺⁺, Sb⁺⁺⁺를 두번째 magnet에서 선택하였다.(그림 1 및 식 15 참조)

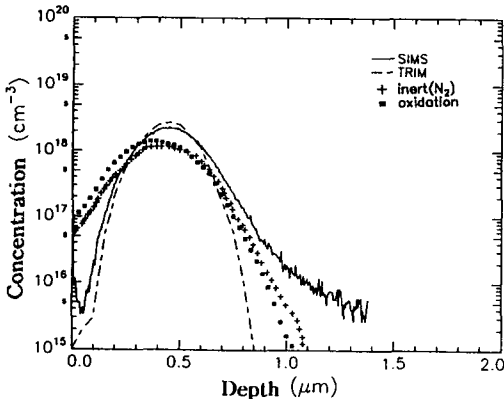


그림 7. 1 MeV에서 Sb⁺⁺로 실리콘에 주입된 SIMS-, SR-, TRIM-profiles의 비교
Fig. 7. Comparison between SIMS-, SR- and TRIM-profiles of Sb⁺⁺ implantation at 1 MeV.

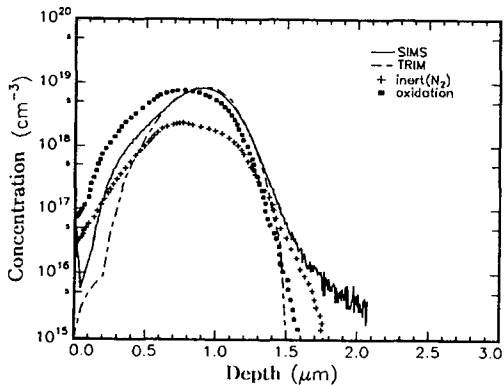


그림 8. 2 MeV에서 Sb⁺⁺로 실리콘에 주입된 대한 SIMS-, SR-, TRIM-profiles의 비교
Fig. 8. Comparison between SIMS-, SR- and TRIM-profiles of Sb⁺⁺ implantation at 2 MeV.

IV. 결론

본 논문에서는 As, Sb를 실리콘 기판에 에너지 영역 1~8.6 MeV로 이온주입하여 SIMS(Cameca 4f)를 이용하여 calibrated sample을 이용하여 정량분석

을 통한 측정결과를 나타내었다.

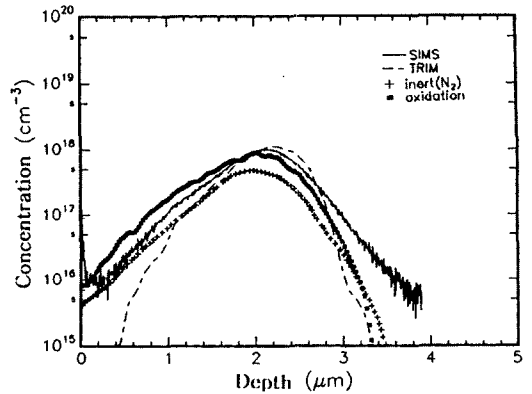


그림 9. 5 MeV에서 Sb⁺⁺⁺로 실리콘에 주입된 SIMS-, SR-, TRIM-profiles의 비교
Fig. 9. Comparison between SIMS-, SR- and TRIM-profiles of Sb⁺⁺⁺ implantation at 5 MeV.

TRIM code, ICECREM simulation을 통하여 얻은 data와 SIMS data를 서로 비교 하였다. 처음으로 one Pearson 함수를 이용하여 SIMS data와 비교 하였다. 단지 하나의 Pearson함수로 적용시킨경우 As의 경우 channeling tail 부분에서 약간의 편차가 있었으나, Sb의 경우 SIMS-profile과 대체로 잘 맞는 편이었다. 그 이유는 같은 에너지에서 이온주입이 행하여진다고 하더라도, As보다 Sb의 질량이 더 크기 때문에 격자에 더 큰 damage가 가해졌으므로, As보다 Sb의 profile이 gauss분포에 더 가깝기 때문이라고 생각되어진다. 이온주입후 전기적인 활성화를 위해서 1000℃에서 열처리 하였는데 RTA인 경우 10 초, furnace annealing인 경우 같은 온도에서 30 분간 열처리 하였다. 이 온도에서는 dose가 1×10¹⁵ cm⁻² 이하인 경우는 주입된 캐리어가 거의 전부가 전기적으로 활성화 되었음을 SR-profile을 통하여 알 수 있었다.(식 16 참조) Sb 이온 주입시 5 MeV 이상의 에너지 영역에서는 TRIM-profile이 측정된 실험 data와 큰 편차를 나타냄을 확인할 수 있었다. 이것은 TRIM-program에서 고에너지영역(5 MeV이상)에서 electronic stopping power(전자 정지력)를 너무 약하게 계산하였기 때문이라고 생각된다. As 이온주입의 경우에서 TRIM data가 5 MeV 이상의 에너지에서도 SIMS data와 대체적으로 잘 맞는 반면에 Sb의 경우는 SIMS-profile보다 더 깊이 오른쪽으로 shift

하였음은 향후 더 정확한 interatomic potential과 electronic stopping power를 계산하여 TRIM source code를 modification하여 SIMS data와 비교해서 개선시키는 지속적인 연구가 더 수행되어야 할 과제라고 생각된다. Sb 이온주입후 처음으로 질소가스와 산소가 분위기에서 열처리를 실행한 다음 SR 방법으로 profile을 측정하여 서로 비교하였다. As은 열처리후 OED(Oxygen Enhanced Diffusion) 효과가 일어나는 반면에 Sb은 산소분위기에서 열처리후 SR 측정을 통하여 ORD (Oxygen Retard Diffusion) 효과가 나타남을 알 수 있었으며, Sb의 경우 MeV의 에너지영역에서 열처리후에 실험결과를 처음으로 본 논문에서 제시하였다.

감사의 글

※ 본 실험을 위해서 도움을 준 독일 Fraunhofer연구소의 Prof. H. Ryssel 교수에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] H. Wong, E. Deng, N. W. Cheung, P. K. Chu, E. M. Strathman, and M. D. Strathman, "Profile Studies of MeV ions implanted into Si", Nucl. Inst. Meth. **B21**, 447, 1987.

[2] L. Frey, S. Bogen, L. Gong, W. Jung, and H. Ryssel, "High energy ion implantation for semiconductor application at Fraunhofer-AIS", Nucl. Inst. Meth. **B62**, pp. 410-417, 1992.

[3] S. Odanaka, T. Yabu, N. Shimizu, H. Umimoto, and T. Ohzone, "A Self-Aligned Retrograde Twin-Well Structure with Buried p⁺-Layer", IEEE Trans. Elec. Dev. vol. 37, no. 7, pp. 1735-1741 July

1990.

[4] A. Stolmeijer, "A Twin well CMOS Process Employing High Energy Ion Implantation", IEEE Trans. Elec. Dev. vol. ED-33, no. 4, pp. 450-457 April 1986.

[5] A. Franko, A. Ferla, E. Rimini, G. Ciavola, and G. Ferla, "High break-down-voltage diodes produced by multiple MeV B implants", Semicond. Sci. Technol. 5, pp. 653-656 1990.

[6] M. S. Dresselhaus, B. Wasserman, and G. E. Wnek, "Ion Implantation of Polymers", Mat. Res. Soc. Symp. Proc. vol. 27, pp. 413-422 1984.

[7] D. W. Brown, R. G. Musket, and Z. A. Munir, "Formation of nearly pure aluminum layer in beryllium using ion implantation", Appl. Phys. Lett. 54(4), 23 pp. 326-328, January 1989.

[8] A. D. Marwick, and G. J. Clark, "Ion Implantation in High-T_c Superconductors", Nucl. Inst. Phys. B37/38, pp. 910-916 1989.

[9] J. P. Biersack, and L. G. Hagmark, "A Monte Carlo computer program for the transport of energetic ions in amorphous Targets", Nucl. Inst. Meth. **174**, 257, 1980.

[10] J. P. Biersack, "Basic physical aspects of high energy implantation", Nucl. Inst. Meth. **B35**. 205, 1988.

[11] H. Ryssel, and I. Ruge, Ion Implantation, John Wiley & Sons (1986).

[12] H. Ryssel, J. Lorenz, and W. Krüger, "Ion implantation into non-planar Targets: Monte Carlo Simulation and analytical Models", Nucl. Inst. Meth. B19/20 pp. 45-57, 1987.

— 저 자 소 개 —

鄭遠采(正會員) KITE JOURNAL OF ELECTRONICS
ENGINEERING Vol. 7 Nr. 2 참조
현재 경기대학교 전자공학과 조교수