

실리콘에 MeV로 이온주입된 인의 결함분포와 profile에 관한 연구

10-9-3

A Study of defect distribution and profiles of MeV implanted phosphorus in silicon

정원채*
(Won-Chae Jung)

Abstract

This study demonstrates the profiles of phosphorus ions in silicon by MeV implantation (1~3 MeV). Implanted profiles could be measured by SIMS(Cameca 4f) and compared with simulation results (TRIM program and analytical description method only using one Pearson function). The experimental result in the peak concentration region has a little bit deviation from simulation data. By RBS and Channeling measurements, the defect distribution of implanted samples could be measured and spectrum are calibrated depth with RUMP simulation. By XTEM measurement, the thickness of defect zone also could be measured. Finally thermal annealing for the electrical activation of implanted ions carried out by RTA(rapid thermal annealing). The concentration-depth profiles after heat treatment was measured by SR(spreading resistance)-method.

key words(중요 용어) : Ion implantation(이온주입), Defect distribution(결함분포), Thermal annealing(열처리), Concentration depth profile(농도 깊이 분포)

1. 서 론

고에너지 (MeV) 이온주입 기술은 고집적회로의 반도체 소자제작 공정에 사용되는데 이에 대한 연구가 신뢰성있는 고에너지 이온 주입장치의 개발로 말미암아 80년대 후반 이후 부터 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 고에너지 이온 주입기술은 집적회로에서 매립층 (buried layer), retrograde well^{1)~4)}, material modification^{5)~7)}, epitaxy 방법을 이용하지 않고 buried collector층의 제작^{8)~9)}등 여러 분야에 응용이 되고있다. 그러나 기초연구는 비교적 많이 수행되지 못한 것은 사실이다. 주입된 이온의 분포를 정확히 이해하는 것은 소자제작시 중요한 요건이 된다. 따라서 본 연구에서는 SIMS로 측정된 profile 과 TRIM simulation¹⁰⁾ 을 통하여 얻은

profile을 서로 비교하였으며 analytical description method로서 단지 하나의 Pearson 함수를 이용한 방법을 처음으로 제시하였다. RBS와 Channeling 측정에 의해서, 이온 주입된 sample의 결함의 거동에 대하여 측정하였고 spectrum은 RUMP simulation에 의해서 depth scale이 계산되었다. XTEM 측정에 의해서 결함영역의 두께도 또한 측정될 수 있었다. 마지막으로 주입된 이온의 전기적인 활성화를 위해서 열처리는 급온 열처리(RTA)에 의하여 실행되었고, 열처리후의 깊이때론 농도의 분포는 SR(spreading resistance) 방법에 의해서 측정 되었다. 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 nor-

* : 경기대학교 전자공학과
접수일자 : 1997년 6월 2일
심사완료 : 1997년 9월 22일

malized distribution function이다.

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

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

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

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

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

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.

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

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.

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

주입된 이온의 분포는 일반적으로 두 개의 moment를 가진 symmetrical한 형태의 gaussian distribution function으로 다음의 식 (7)로 나타내어진다.

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

만약 profile의 형태가 asymmetrical한 형태를 나타내게 되면 gauss 분포함수로 profile의 형태를 묘사할 수가 없게된다. 이 경우 3, 4 번째의 moment를 가진 Pearson 함수를 이용함으로서 실험 data를

fit 시키는 것이 더 적합하다. Pearson 분포의 함수들은 식 (8)의 해로서 나타나게 되는데, 분포함수 $f(x)$ 에 대한 미분방정식은 식 (8)과 같다.

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

여기서 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.

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.

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

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

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

2. 실험

본 연구에서는 반도체에서 불순물 doping element로 자주 사용되는 phosphorus 이온들을 (100)의 방향성을 가지는 p type 실리콘 기판에 prototype의 Genus Ionex Tandem 이온 주입장치를 이용하여 이온 주입 하였다. 이때에 실리콘 기판의 비저항 $\rho = 4 \sim 5 \Omega \cdot \text{cm}$ 이었고 channeling 효과를 억제하기 위해서 이온주입시 beam line이 7°의 각으로 기울어지게 하여서 이온주입의 실험을 실행하였다. 주입된 이온의 농도-깊이 분포는 SIMS(Cameca 4f)를 이용하여서 측정하였다. SIMS 측정시 sputtering yield를 좋게 하기위해서 phosphorus가 주입된 sample은 primary ion 으로 Cs을 이용하였다. Sputter후에 crater 경계에 의한 효과가 profile의 quality에 영향을 주기때문에 우선 넓게 주사한 후에 주사면적을 매우 작게 하였고 정량분석을 위해서 crater의 깊이를 정확하게 측정하기 위해서 Dektak-profilometer가 사용되었다. 고에너지로 주입된 이온의 profile의 경우는 SIMS측정시 야기된 소위 knock on 효과를 무시 할 수 있다. 결함의 분포를 측정하기 위해서 RBS(Rutherford Back Scattering)/Channeling 방법을 이용하여 주입된 이온의 도즈(dose)에 따른 defect 분포의 정도를 알 수 있었다. 또한 XTEM(Cross-sectional Transmission Electron Microscopy) 측정을 통하여 high dose로 이온주입된 경우 손상에 의한 비정질층의 형성을 확인할 수가 있었다. 주입된 이온의 전기적인 활성화를 위해서 열처리공정이 필요하다. 원래의 이온의 분포를 가급적 유지하면서 약한 확산효과를 나타내기위해서 급은 열처리공정(RTA)이 행하여졌다. 이때에 열처리온도는 1000°C, 시간은 10초동안 열처리 하였다. 그후에 전기적으로 활성화된 이온의 분포를 측정하기위해서 SR(spreading resistance)방법을 이용하였다. SIMS-, SR-, TRIM-profile을 서로 비교하였다. 또한 처음으로 analytical한 방법으로 ICECREM-simulation¹¹⁾을 이용하여 단지 4개의 parameter만 사용하여 SIMS-profile에 맞게 fit 시켰다.

3. 결과 및 고찰

3.1 이온주입후 결함의 분포에 대한 조사

Phosphorus 는 n type 을 위한 doping element로서 사용되는데, 1~3 MeV의 에너지 영역에서 서로 다른 이온 dose로 이온주입 하였다. SIMS (secondary ion mass spectroscopy)로 부터 측정된 실험 data는 단지 4개의 parameter만 사용한 one Pearson function를 이용하여 simulation 하였다.

RBS(Rutherford Backscattering) 측정을 통하여 channeling-, virgin-, random-spectrum을 서로 비교 하였다. 그 결과로부터 1 MeV인 경우 비정질이 되는 dose는 약 $1.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 이라는 것을 XTEM 측정을 통하여 확인할 수 가 있었다. RBS 측정을 위해서 4개의 축으로 구성된 goniometer는 45°의 각으로 beam line에 꺾어져 있고 He ion이 goniometer에 부착된 samples로 MeV의 에너지로 부딪치면, backscattering되는 α 입자를 실리콘과 gold로 형성된 schottky diode로 제작된 detector에 collect 되어진다. 따라서 측정된 spectrum은 에너지에 대한 counts로서 나타내어진다. 이때에 counts는 normalized yield로서 나타내어진다. 1 MeV phosphorus이온이 $1.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 의 dose로 주입된 경우 200 kV에서 동작하는 JEOL 200CX 장비를 이용하여 XTEM측정을 통하여 defect 영역의 두께는 0.28 μm 임을 알 수 있었다.(그림 1 참조) 또한 1, 1.5, 2, 3 MeV로 phosphorus를 dose의 범위가 1×10^{14} 에서 $9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 로 이온주입한후 channeling spectrum은 그림 2에서 그림 5에 나타내었다. Line type으로 spectrum이 나타난 경우 가장 아래에 있는 선은 virgin, dose량이 증가함에 따라서 점차로 위의 선으로 나타내어진다.(그림 2, 그림 3 참조) 1 MeV로 phosphorus가 주입된 경우는 2 MeV He 이온(He^{++})

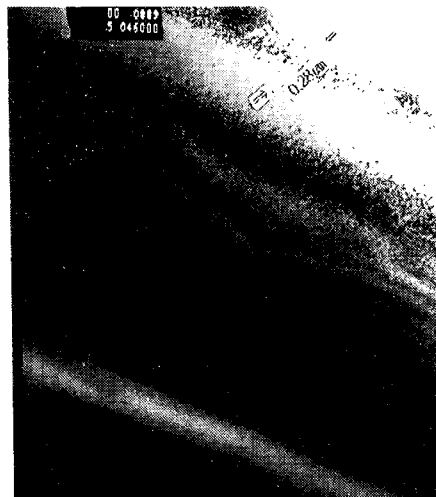


그림 1. 에너지 1 MeV, $1.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 의 dose로 이온주입후 XTEM 결과.

Fig. 1. XTEM result for phosphorus implanted silicon. ($E=1 \text{ MeV}$, $\text{dose}=1.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$)

이 이용되었고 1.5~3 MeV로 phosphorus가 주입된 경우는 3 MeV He 이온(He⁺⁺)을 이용하였다. 이온주입 동안에 높은 전류로 주입된 경우는 self annealing 효과가 나타난다. 같은 면적(5 mm²)에서 1 MeV의 에너지에서는 1 μA의 전류로 1.5 MeV에서는 7 μA의 전류로 이온주입이 되었기 때문에 1.5 MeV의 에너지에서 P(power)=V(가속전압)×I(beam의 전

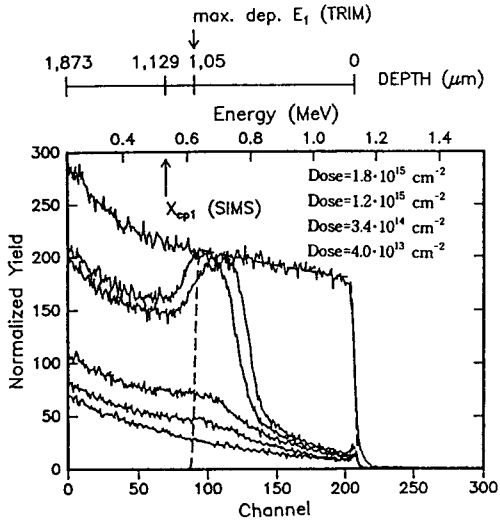


그림 2. 에너지 1 MeV에서 서로 다른 dose로 이온 주입후의 channelingspectra.
Fig. 2. Channelingspectra of different dose at 1 MeV.

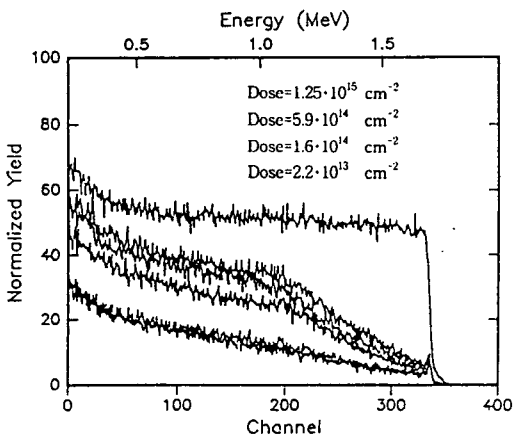


그림 3. 에너지 1.5 MeV에서 서로 다른 dose로 이온 주입후의 channelingspectra.
Fig. 3. Channelingspectra of different dose at 1.5 MeV.

류)의 식에서 알 수 있듯이 power heating에 의한

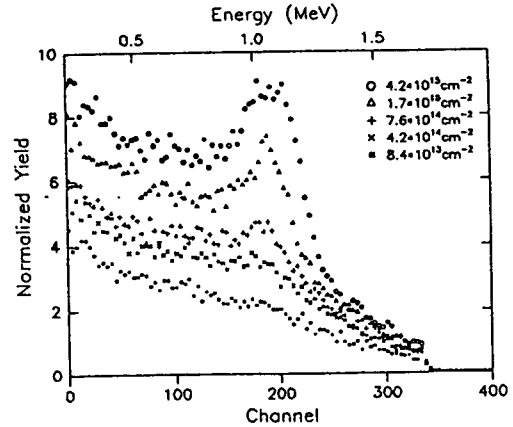


그림 4. 에너지 2 MeV에서 서로 다른 dose로 이온 주입후의 channelingspectra.
Fig. 4. Channelingspectra of different dose at 2 MeV.

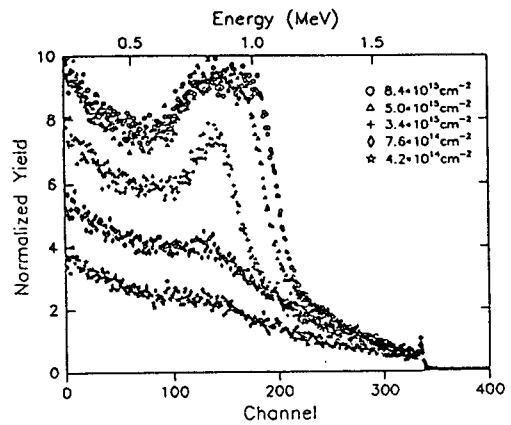


그림 5. 에너지 3 MeV에서 서로 다른 dose로 이온 주입후의 channelingspectra.
Fig. 5. Channelingspectra of different dose at 3 MeV.

self annealing 효과가 나타나기 때문에 defect zone이 감소하므로 높은 dose량에 따른 비정질층의 두께가 감소하기 때문이다.(그림 2에서 그림 5 참조)

3.2. TRIM, SIMS, SR의 profile 비교

TRIM program을 이용한 computer simulation은 단결정이 아닌 비정질 기판에서의 불순물 농도-깊이 분포를 나타낼 수 있다. 그러나 실제적으로는 단결

정에 주입된 이온들은 거의 channeling tail을 나타내고 있다. 이러한 현상을 피하기 위해서 이온주입시 channeling 효과를 억제하기 위해서 보통 7°의 각으로 beam line을 tilting하여 사용되고 있다. 그럼에도 불구하고 이러한 channeling 효과는 de-channeling 효과에 의해서 다시금 원자들 사이로 channeling 효과가 나타난다. 얇은 접합(shallow junction)을 만들기 위해서 보통 Ge, Si 과 같은 이온들로 preamorphization 시킨 다음 원하는 불순물을 도핑시킨다. 이와같이 사전에 비정질형태로 하면 channel 부분이 손상되어 channeling tail을 강하게

억제 할 수 있기 때문이다. 따라서 SIMS와 TRIM의 profile을 서로 비교하면 TRIM-simulation후의 profile은 channeling tail이 없으나, 실제로는 비정질이 아닌 단결정기판에 이온들이 주입되기 때문에 약간의 channeling 효과가 SIMS-profile에서 나타난다.

그러나 이온의 dose가 증가하면 실리콘의 격자가 손상되어 점차로 비정질화하게 되어진다. 그림 6에서 그림 8은 1 MeV에서 서로 다른 dose로 주입된 인의 SIMS-, TRIM-, SR-profile들을 나타낸다. 그림 9에서 나타난것 처럼 1.5 MeV에서 서로 다른

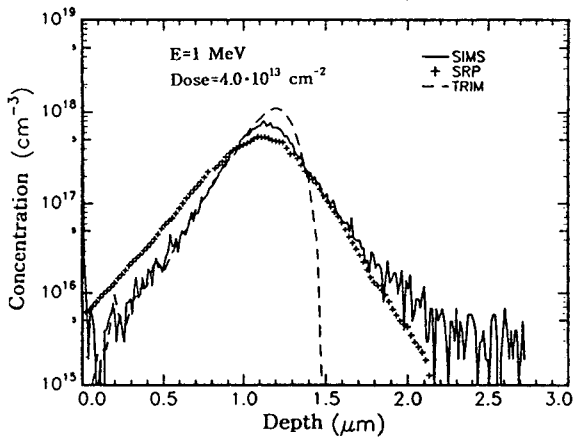


그림 6. 측정된 data와 simulation-profile의 비교.
Fig. 6. Comparison between measured data and simulation-profile.

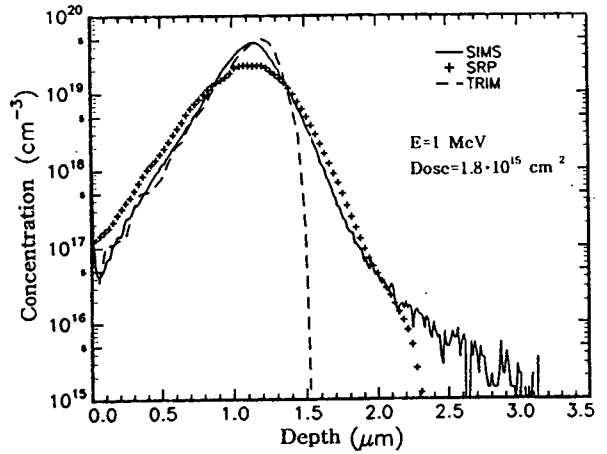


그림 8. 측정된 data와 simulation-profile의 비교.
Fig. 8. Comparison between measured data and simulation-profile.

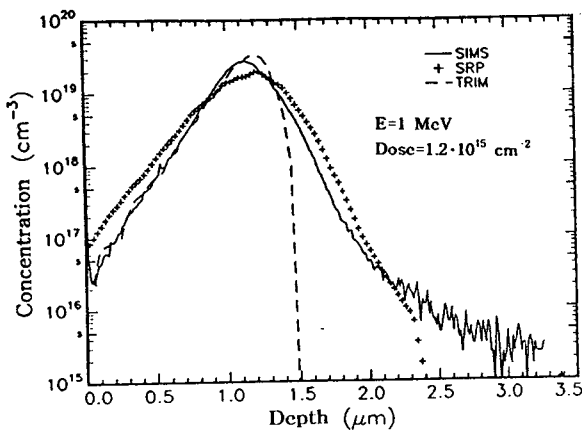


그림 7. 측정된 data와 simulation-profile의 비교.
Fig. 7. Comparison between measured data and simulation-profile.

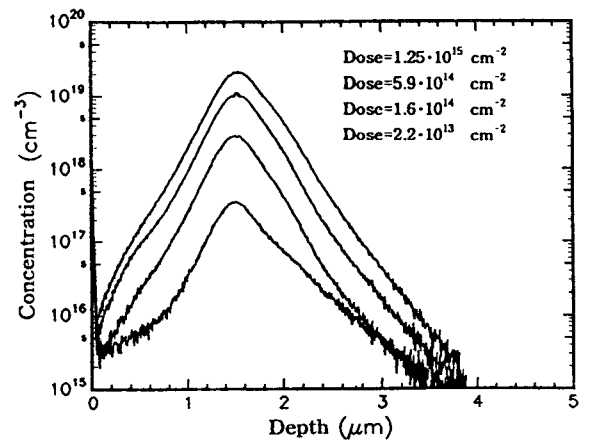


그림 9. 에너지 1.5 MeV 에서 서로 다른 dose로 인 이 주입된 SIMS-profile.
Fig. 9. SIMS-profiles of implanted phosphorus ions with different dose at 1.5 MeV.

dose로 인이 주입된 경우 측정된 SIMS-data는 peak-concentration의 위치가 같은 depth에서 나타나기 때문에 정량분석을 통한 정확한 실험 data임을 확인할 수 있었다. 실리콘 기판에 high dose로 인이 이온주입되면, 기판의 격자손상이 일어나기 때문에 전기적으로 active하지 못하다. 따라서 추가적으로 열처리를 하면 손상된 격자가 회복되어 전기적인 활성을 띠게된다. SR측정 방법은 SIMS 측정이 주입된 전체이온의 분포를 측정하는데 비해서 단지 전기적으로 active한 carrier들만 측정하게 된다. SR측정은 sample을 경사지게 미세한 다이아몬드 powder로 갈아서 두 개의 탐침이 경사면을 따라 내려가면서 spreading resistance값을 측정한 다음 carrier의 농도 분포로 변환 시키는 방법이다. 주입된 이온이 전기적으로 활성화 한가의 척도는 carrier의 activation 정도를 통하여 알 수 있는데, 아래의 식(15)에 나타내었다.

$$Activation(\%) = \frac{\text{측정된 전체농도 (SR)}}{\text{측정된 전체농도 (SIMS)}} \times 100 \quad (15)$$

여기서 전체농도는 거리에 따른 농도의 적분을 의미한다. 주입된 이온의 전기적인 활성화의 정도를 알기 위해서는 SIMS, SR의 측정방법을 통해서 식(15)로 계산할 수가 있다.

3.3 SIMS 결과와 하나의 Pearson 함수 모의실험
고에너지로 주입된 이온들의 profile은 지금까지

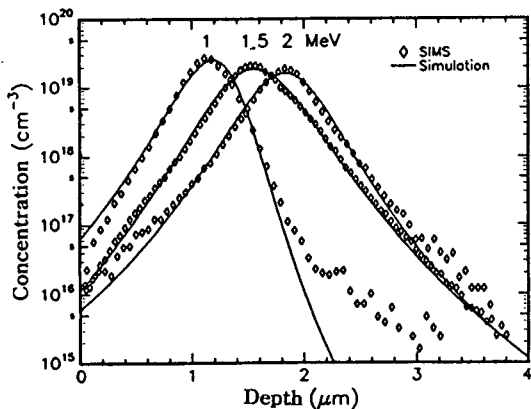


그림 10. 이온 주입된 phosphorus 이온의 측정된 SIMS-data와 simulation-profile의 비교.
Fig. 10. Comparison between measured SIMS-data and simulation-profile in phosphorus implantation.

발표된 논문에 의하면 dual Pearson방법을 사용하였는데, 단지 4개의 변수만으로 측정된 profile을 analytical한 방법으로 맞게 fit 시켜서 본 논문에서 처음으로 제시하였다. 하나의 Pearson 함수는 4개의 parameter, 즉 R_p , ΔR_p , γ , β 에 의하여 결정되는데, 대체적으로 고에너지로 주입된 profile은 SIMS 측정 후에 Pearson I, IV, VI의 함수형태로 나타난다. Fitted profiles의 peak concentration의 위치는 단지 주입된 이온의 dose량에 의해서 결정되어진다. Phosphorus 이온주입의 경우 1 MeV에서 약간의 channeling효과에 의해서 profile의 tail부분에서 simulation-profile과 약간의 deviation을 나타내었을 뿐 1.5, 2 MeV에서는 완벽하게 fit 되었다.(그림 10, 표 1. 참조) 측정된 SIMS와 SRP data로 부터 식(3~6)을 이용하여 4개의 moments를 계산한 결과를 표 2에 TRIM data와 비교할 수 있도록 나타내었다. 그림 11은 SRP data로 부터 계산된 4개의 moments

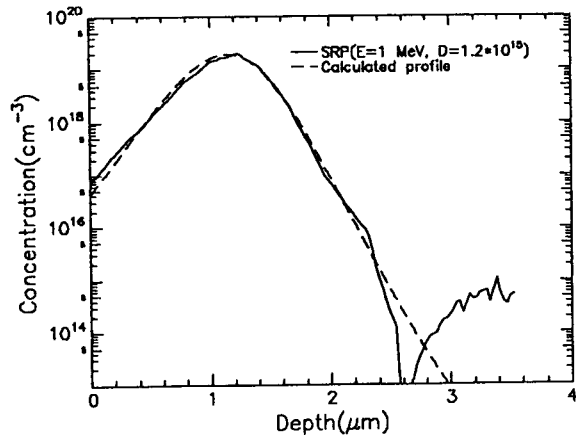


그림 11. 계산된 4개의 moments로 부터 재구성한 profile과 SRP의 비교.
Fig. 11. Comparison between measured SRP-data and reconstructed profile from calculated 4 moments.

표 1. Phosphorus 이온 주입에서 발췌된 moments (4개의 변수).

Table 1. Extracted 4 moments from phosphorus implanted silicon.

Energy (MeV)	Dose (cm ⁻²)	R _p (μm)	ΔR _p (μm)	γ	β
1	1.2·10 ¹⁵	1.134	0.2248	-1.045	7.5
1.5	1.25·10 ¹⁵	1.570	0.3083	0.178	5.65
2	1.0·10 ¹⁴	1.820	0.2908	-0.185	6.92

를 pearson 함수를 이용한 ICECREM program에 적용하여 profile을 재구성한 profile과 SRP를 서로 비교하였다. 이 경우 두개의 profile들이 잘 일치하고 있음을 나타내고있다.

표 2. 1 MeV에서 측정 과 TRIM data로 부터 계산된 moments (4개의 변수).

Table 2. Calculated 4 moments from experimental and TRIM data at 1 MeV.

Data	Dose(cm ⁻²)	R _p (μm)	ΔR _p (μm)	γ	β
TRIM	1.2·10 ¹⁵	1.092	0.1822	-1.31	5.82
SRP	1.2·10 ¹⁵	1.125	0.2693	-0.26	3.67
SIMS	1.2·10 ¹⁵	1.134	0.2248	-0.79	7.60

4. 결 론

본 논문에서는 phosphorus를 실리콘 기판에 에너지 영역 1~3 MeV로 이온주입하여 SIMS (Cameca 4f)를 이용하여 측정하였다. TRIM 과 ICECREM computer-simulation을 통하여 얻은 data와 SIMS-data를 서로 비교 하였다. 처음으로 one Pearson 함수를 이용하여 SIMS data와 비교 하였다. 이온주입 후 전기적인 활성화를 위해서 1000°C에서 열처리 하였는데 RTP를 사용하여 10 초동안 열처리 하였다. 이 온도에서는 dose가 1·10¹⁵ cm⁻² 이하인 경우는 주입된 캐리어가 거의 다 전기적으로 활성화 되었음을 channeling spectrum 또는 SR-profile을 통하여 알 수 있었다. High dose의 경우는 channeling 효과가 더 적게 나타나는데, 이것은 이온주입량의 증가에 따라서 격자에 더 많은 손상에 의하여 비정질화 하기 때문이다. 따라서 이경우의 profile의 형태는 gauss분포의 접근한 형태로 나타나게된다. 본 논문에서는 4개의 moments를 정확히 계산하여 profile을 재구성함으로써 측정된 profile과 잘 일치하는 one pearson 함수를 이용한 방법을 처음으로 나타내었다. 또한 1~2 MeV의 에너지 영역에서 주입된 phosphorus 이온의 분포와 서로 다른 dose로 주입된 경우 defect의 분포와 열처리후에 전기적으로 활성화 된 이온의 분포를 TRIM simulation, XTEM, SIMS, SRP, RBS/Channeling 방법을 통하여 자세히 나타내었으며, channeling tail을 나타내지 못하는 TRIM 결과 보다 one pearson 함수를 이용한 새로운 방법을 본 논문에서 제시하고 있다. 아울러 본 실험에서의 data는 정량분석을 통한 정확한 실험 data로서

고집적으로 제작시 MeV 이온주입 공정기술에서 중요한 data로서 사용되리라 고 사료된다.

※ 본 실험을 위해서 도움을 준 독일의 Fraunhofer 연구소의 H. Ryssel 교수 및 연구원들에게 감사드립니다. 이 연구는 경기대학교 1996년도 교내학술연구조성비 (신진연구비)의 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Hsiao-Yi Lin and Chiu H Ting, "Improvement of CMOS Latch-up immunity using a high energy implanted buried layer", Nucl. Inst. Phys. B37/38 1989 pp.960-964
2. Shinji Odanaka, Toshiki Yabu, Norisato Shimizu, Hiroyuki Umimoto, and Takashi Ohzone, "A Self-Aligned Retrograde Twin-Well Structure with Buried p⁺-Layer, IEEE Tran. Elec. Dev. Vol. 37 No. 7 July 1990 pp.1735-1741
3. A.Stolmeijer, "A Twin Well CMOS Process Employing High Energy Ion Implantation", IEEE Trans. Electron Dev. Vol. ED-33 No. 4 April 1986 pp.450-457
4. A Di Franco, A La Ferla, E Rimini, G Ciavola, and G Ferla, "High breakdown-voltage diodes produced by multiple MeV B implants", Semicond. Sci. Technol. 5 1990 pp.653-656
5. M.S. Dresselhaus, B.Wasserman, and G.E. Wnek, "Ion Implantation of Polymers", Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 27 1984 pp.413-422
6. 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 January 1989 pp.326-328
7. A.D.Marwick and G.J.Clark, "Ion Implantation in High-T_c Superconductors", Nucl. Inst. Phys. B37/38 1989 pp.910-916
8. J.F.Ziegler, "High Energy Ion Implantation", Nucl. Inst. Phys. B6 1985 pp.270-282
9. K.J.Reeson, "Fabrication of buried layers of SiO₂ and Si₃N₄ using Ion Beam Synthesis", Nucl. Inst. Phys. B19/20 1987 pp.269-278

10. J.P.Biersack, "Calculation of projected ranges-analytical solutions and a simple general algorithm", Nucl. Inst. Phys. 182/183 1981 pp. 199-206
11. H.Ryssel, K.Haberger, K.Hoffmann, G.Prinke, R.Dümcke, A.Sachs, "Simulation of Doping Processes", IEEE Trans. Electron Dev. ED-27, 1980 pp.1484-1492

저자소개



정원채

1957년 5월 6일생. 1981년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1983년 동 대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1994년 1월 독일 에어랑겐-뉘른베르그 대학교 전기전자공학과 졸업(공학박). 1988년-1994년 독일 프라운호퍼 연구소 연구원. 1994년-1995년 2월 Lucky Goldstar Siltron 연구소 차장. 1995년 3월-현재 경기대학교 전자공학과 조교수.