

# 비정질 실리콘에서 인의 도핑과 이온주입에 따른 농도분포에 대한 연구

12-1-3

## A Study of Concentration Profiles in Amorphous Silicon by Phosphorus Doping and Ion Implantation

정원채\*

(Won-Chae Jung)

### Abstract

In this study, the undoped amorphous layers and phosphorus doped amorphous layers are fabricated using LPCVD at 531°C with SiH<sub>4</sub> gas or at same temperature with PH<sub>3</sub> gas during deposition, respectively. The thickness of deposited amorphous layer from this experiments was 5000 Å. In this experiments, undoped amorphous layers are deposited with SiH<sub>4</sub> and Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub> gas in a low pressure reactor using LPCVD. These amorphous layers can be doped for poly-silicon by phosphorus ion implantation. The experiments of this study are carried out by phosphorus ion implantation with energy 40 keV into P doped and undoped amorphous silicon layers. The distribution of phosphorus profiles are measured by SIMS(Cameca 6f). Recoiling effects and two dimensional profiles are also explained by comparisons of experimental and simulated data. Finally range moments of SIMS profiles are calculated and compared with simulation results.

**Key Words(중요용어):** Amorphous silicon layer(비정질 실리콘층), LPCVD(저압화학기상증착), Ion Implantation (이온주입), AFM(원자력간미세현미경), SIMS(이차이온질량분광기), Computer Simulation (컴퓨터 모의실험)

### 1. 서 론

박막 다결정실리콘층의 형성은 MOS 공정에서 매립단자(buried contact)로서, 다결정실리콘 게이트, SRAM(Static Random Access Memory), DRAM(Dynamic Random Access Memory) memory cell, bipolar technology, thin film transistor, ROMs(Read-Only Memories), EPROM(Erasable Programmable ROMs), solar cell, LCD(Liquid Crystal Display)등 반도체공정<sup>1,2)</sup>에서 다양하게 사

용되어지고 있다. 본 논문에서는 LPCVD 방법으로<sup>3,4,5,6)</sup> 인이 도핑된 또는 도핑되지 않은 비정질 실리콘층들을 SiO<sub>2</sub>/Si층위에 증착하여 n<sup>+</sup> 도핑을 위하여<sup>7,8,9)</sup> phosphorus를 이온주입한 다음 SIMS(Secondary Ion Mass Spectroscopy)로 주입된 인의 분포를 측정하였다. 이때에 도핑되지 않은 비정질층에 인이 주입된 경우는 가우스 분포의 형태로 나타난 반면에 인이 도핑된 비정질층에서의 인의 분포는 농도분포의 아래 부분에서 knock on effect를 나타내었다. LPCVD로 증착된 비정질층은 580°C 이상의 온도로 열처리하면 비정질에서 다결정의 구조로 변하게된다. 이러한 비정질층을 열처리를 하면 결정화가 되면서 결정립 크기(grain size)가 커지게 되어 비저항값이 감소하게 된다. 증착온도가 580°C 이상에서는 다결정(polycrystalline) 실리콘의 구조가 되

\* 경기대학교 전자공학과

(경기도 수원시 팔달구 이의동 산 94-6, Fax:0331/44-6300

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

1998년 7월 13일 접수, 1998년 11월 22일 심사완료

기 때문에 반도체 공정시 ULSI(Ultra Large Scale Integrated Circuits) chip 제작사에서는 일반적으로 600~650℃에서 공정이 실행되고 있으나 대부분의 반도체회사에서는 620℃의 온도에서 LPCVD 방법으로 다결정(polycrystalline) 실리콘 층을 제작하고 있다. 따라서 본 실험에서는 이 보다 더 낮은 공정 온도인 531℃에서 비정질 실리콘층들을 증착하였다. 증착된 이층들을 한번 더 높은 온도에서 열처리하면 비정질 다결정실리콘은 다결정실리콘으로 바뀌게 된다. 다결정실리콘(polysilicon)의 제작방법은 LPCVD 방법으로 100%의 silane(SiH<sub>4</sub>) 또는 질소(nitrogen)로 희석된 20~30%의 silane을 사용하고 있다. 온도는 620℃, 압력은 50 Pa의 조건하에서 열 분해에 의한 화학반응식은 다음과 같다.



이때에 증착비(deposition rate)는 100~200 Å/min 이었다. 이 조건에서 증착된 도핑되지 않은 다결정 실리콘(polysilicon)층은 10<sup>4</sup> Ω·cm의 비저항값을 가지는 매우 높은 저항값을 나타내었다. 본 실험에서 증착된 도핑되지 않은 비정질층들은 식 (1)에 같은 압력에서 531℃의 온도조건에서 Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub> gas를 추가하였다. 다결정실리콘(polysilicon)이 전기적인 전도 성질을 가지기 위해서 SiH<sub>4</sub>에 B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, PH<sub>3</sub>, AsH<sub>3</sub> gas를 첨가하여 도핑시킨다. 두께 균일도를 위해서 수평로 대신에 수직로를 이용하였다. 화학기상증착 반응기에서 증착온도가 높아질수록 결정립크기는 더 작아진다. 강하게 인이 도핑된(> 10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>)경우는 800℃ 이상의 온도에서 결정립크기가 급격히 증가한다. 이때에 결정립크기는 0.5 μm 정도가되며 층 전체의 두께로 확장된다.<sup>1,2)</sup> 580℃ 아래에서 증착된 비정질 실리콘층들은 표면이 매끄러운(smooth) 반면에 620℃ 이상의 더 높은 온도에서 증착된 다결정(polycrystalline) 실리콘 층들은 결정립크기의 증가때문에 거친 표면구조를 나타내게 된다.<sup>2)</sup> 마지막으로 SIMS 실험과 모의실험의 결과를 서로 비교하여, 농도분포, recoiling 효과에 대한 설명을 하였다. 여기서 사용된 모의실험 프로그램들은 Boltzmann 전달방정식을 이용한 RAMM<sup>10)</sup>, Monte Carlo 프로그램인 TRIM.2d<sup>11)</sup>, TRIM.casc<sup>12)</sup> 와 pearson 함수를 이용한 ICECREM<sup>13)</sup> 프로그램을 이용하여 모의실험하였다. 또한 불순물 농도의 2차원적인 분포를 microtec<sup>14)</sup> simulator를 이용하여 나타내었다. 이온 주입된 이온의 분포는 4개의 변수로써 농도분포를 재구성할 수가 있는데, 깊이에 따른 농도는 식(2)

로 나타내어진다.

$$C(x) = N_{\square} \cdot f(x) \quad (2)$$

여기서 N<sub>□</sub>는 주입된 이온의 주입량을 나타내고 c(x)는 깊이에 따른 농도를 의미하며, f(x)는 규격화된 분포함수이다.

$$N_{\square} = \int_0^{\infty} C(x) \cdot dx \quad (3)$$

첫 번째 모멘트(moment)로서 수직으로 입사된 이온의 평균 깊이는 식(4)으로 나타내어진다.

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

두 번째 모멘트로서 표준편차(ΔR<sub>p</sub>)는 식(5)로 나타내어진다.

$$\Delta R_p^2 = \int_0^{\infty} (x - R_p)^2 f(x) dx \quad (5)$$

세 번째 모멘트로서 비스듬한 정도 (skewness: γ)는 농도분포의 무게중심의 이동을 나타내며 식(6)에 나타내었다. γ가 양의 값이면 오른쪽으로 음의값을 가지면 왼쪽으로 무게중심이 각각 이동하는 정도를 나타낸다.

$$\gamma = \int_0^{\infty} \frac{(x - R_p)^3 f(x) dx}{\Delta R_p^3} \quad (6)$$

네 번째 모멘트로서 뾰족한정도(kurtosis: β)는 농도분포의 뾰족한 정도를 나타내며 식(7)에 나타내었다. β의 값이 크면 농도분포의 형태가 가빠르게 되고 β의 값이 작아지면 침투치 농도영역에서 완만한 형태를 나타내게된다.

$$\beta = \int_0^{\infty} \frac{(x - R_p)^4 f(x) dx}{\Delta R_p^4} \quad (7)$$

주입된 이온의 분포는 일반적으로 두 개의 모멘트를 가진 대칭적인 형태의 가우스 분포함수로 다음의 식(8)로 나타내어진다.

$$C(x) = \frac{N_{\square}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \Delta R_p}} \times \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2 \cdot \Delta R_p^2}\right] \quad (8)$$

가우스 분포로 이온주입되고 열처리후에 나타나는 농도분포는 식 (8)에서  $\Delta R_p$  대신에  $\sqrt{(\Delta R_p^2 + 2Dt)}$  의 식을 대입하면 된다. 만약 농도분포의 형태가 비대칭적인 형태를 나타내게 되면 가우스 분포함수로 농도분포의 형태를 묘사할 수가 없게된다. 이 경우 3, 4 번째의 모멘트를 가진 Pearson 함수를 이용함으로써 실험 데이터를 맞추는 것이 더 적합하다. Pearson 함수들은 식(9)의 해로서 나타내게 되는데, 분포함수  $f(x)$ 에 대한 미분방정식은 식(9)와 같다.

$$\frac{df}{dy} = \frac{y-a}{b_0 + b_1 y + b_2 y^2} \cdot f(y) \quad (9)$$

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

$$a = -\frac{\Delta R_p \cdot \gamma \cdot (\beta + 3)}{A} \quad (10)$$

$$b_0 = -\frac{\Delta R_p^2 \cdot (4\beta - 3\gamma^2)}{A} \quad (11)$$

$$b_1 = a \quad (12)$$

$$b_2 = -\frac{(2\beta - 3\gamma^2 - 6)}{A} \quad (13)$$

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

이러한 미분방정식 식(9)로부터 parameter의 크기에 따라서 7개의 서로 다른 형태의 함수들이 주어지게 된다. 저에너지와 고에너지 이온주입에 자주 이용되는 형태는 Pearson-IV의 함수로서 식(14)로 나타내어진다.

$$f(x) = K \cdot |b_0 + b_1(x - R_p) + \frac{b_2(x - R_p)^2}{2b_2}|^{\frac{1}{2b_2}} \times \exp\left[\frac{(b_1/b_2 + 2b_1)}{\sqrt{4b_0b_2 - b_1^2}}\right] \times \arctan\left[\frac{2b_2(x - R_p) + b_1}{\sqrt{4b_0b_2 - b_1^2}}\right] \quad (14)$$

여기서  $K$ 는  $\int_0^{\infty} f(x)dx = 1$  이 될 때의 상수이고  $\gamma$  와  $\beta$  값의 영역은 식(15)로 나타내어진다.

$$0 < \gamma^2 < 32, \quad (15)$$

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

## 2. 실험

본 실험에 사용된 웨이퍼는 비저항이  $15\Omega \cdot \text{cm}$  이고 두께가  $675\mu\text{m}$  인 6인치 p type을 사용하였다. 실리콘 기판위에  $\text{SiO}_2$ 층을 건식 열산화를 통하여  $1000\text{\AA}$ 의 두께로 성장시킨 다음 LPCVD 방법으로 비정질 폴리실리콘 구조로 인이 도핑된 경우와 도핑되지 않는 층들을 증착하였다. 이때에  $\text{SiO}_2$ 층이 실리콘 기판위에 성장된 이유는 실리콘 기판위에 직접적으로 얇은 비정질층을 형성하는것 보다 두께의 균일도를 더 좋게 하기 위해서이다. 증착된 비정질층의 두께 균일도는  $\pm 1\%$ 이내 이었으며  $\text{SiH}_4$ 에  $\text{Si}_2\text{H}_6$ 를 추가하여 비정질층의 성장율을 더 높였다. LPCVD 방법으로 도핑되지 않은 비정질층은  $\text{SiH}_4$ 를 분당 120 cc로 흘러주면서 압력이 50 pa로 유지하였고, 인이 도핑된 비정질층은  $\text{N}_2$  gas 분위기에서 0.1 %의  $\text{PH}_3$ 를 분당 400 cc로 흘러주면서 더 높은 성장율을 만들기위해서 추가로  $\text{Si}_2\text{H}_6$ 를 분당 70 cc로 흘러주었으며, 압력은 50 pa로 유지하였다. 이때에 LPCVD로 증착된 비정질 실리콘층의 두께는 각각 5000 $\text{\AA}$  이었다. 이 비정질층들은 850 $^\circ\text{C}$ 에서 30분간 질소가스 분위기에서 열처리한후 면저항 ( $R_s$ )값이 16  $\Omega/\square$  이었다. 이때에 면저항 편차 (sheet resistance deviation)는  $\pm 2\%$  이내이었다. 그 다음 증착된 각각의 비정질층에 인 이온을 Varian 160p 이온주입장치를 이용하여 이온주입하였다. 이때에 이온 원가스(source gas)는  $\text{PH}_3$ 가 사용되었다. 이때에 주입된 이온의 에너지는 40 keV 이었으며, 인 이온(P<sup>+</sup>)의 도즈(dose)량은  $5.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$  이었다. 주입된 인의 분포는 정량분석을 위하여 표준시료를 이용하여 SIMS(Cameca 6f)로 측정하였다. 시료형태 및 제작과정은 LPCVD로 증착된 도핑 되지 않은 비정질 실리콘에 인이 이온주입된 시료와 인이 도핑된 비정질 실리콘에 인이 이온주입된 시료를 제작하여 측정 및 평가 하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

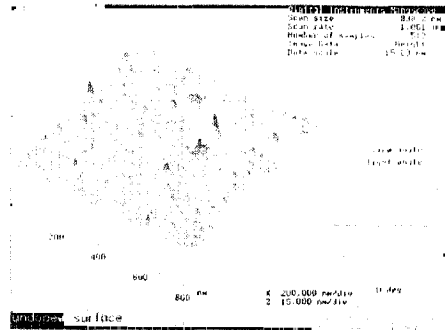
LPCVD방법으로 도핑되지 않은 경우와 인이 도핑된 비정질 실리콘층들을 SiO<sub>2</sub>/Si 기판에 증착한 다음 인을 Varian사 ion implanter로 이온주입하여 SIMS(Cameca 6f)로 정량분석을 통하여 주입된 인의 분포를 측정하였다. SIMS측정시 스퍼터수율을 좋게하기 위해서 일차이온으로 Cs 이온을 사용하였다. 이때에 측정된 조건은 다음과 같다.

Source: Cs<sup>+</sup>, size of the analyzed area:  $\phi$  60  $\mu$ m  
 Energy: 3 keV, mass resolution: 4000  
 intensity: 51nA, Raster size: 120  $\mu$ m  
 Secondary ion: P<sup>-</sup>, Sample High Voltage: 5kV

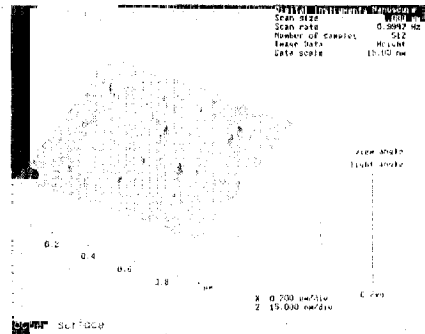
SIMS측정시 인(<sup>31</sup>P) 과 질량이 같은 분자(<sup>30</sup>SiH)의 형태를 구별하는 것은 쉬운 일이 아니다. 이 경우 질량분해능이 적어도 3955를 나타내야만 측정이 가능하였다. 왜냐하면 SiH와 P의 질량차이가 0.0078 amu 이기 때문에  $m/\Delta m(31/0.0078)$ 은 3955의 값을 나타내게 된다. 이때에 SiH에서 Si의 질량은 30 amu 이다. 따라서 인의 경우 Cameca SIMS는 ATOMIKA SIMS 측정장비와 비교해서 훨씬 더 좋은 질량분해능을 가짐을 측정된 결과를 서로 비교함으로써 알 수 있었다. 미국의 digital instrument사의 AFM(atomic force microscopy) 사용하여 표면거칠기를 측정하였다. 이때에 인이 도핑되지 않은 경우와 도핑된 경우에 표면거칠기의 실효값(rms)은 각각 7.17Å, 6.65Å를 나타내었다. 이것은 인이 도핑되지 않은 경우가 도핑된 경우보다 표면의 거칠기가 더 크다는 것을 나타내는데, 이 이유는 인이 도핑된 경우에 N<sub>2</sub> 가스를 사용하였기 때문이라고 사료된다. 580°C아래에서 증착된 비정질 실리콘층들은 표면이 매끄러운 반면에 620°C 이상의 더 높은 온도에서 증착된 다결정(polycrystalline) 실리콘 층들은 결정립크기의 증가때문에 거친 표면구조를 나타내게된다는 결과에 일치하게 본 실험 data에서는 531°C에서 LPCVD 증착에 의한 두 경우는 대체로 표면거칠기가 좋은 편인 smooth한 표면을 나타냈으며, 공정조건에 따라서 측정 결과가 달라짐을 확인하였으며, AFM으로 측정된 결과는 그림 1의 (a), (b)에 각각 나타내었다.

도핑되지 않은 비정질 실리콘 과 인이 도핑된 비정질 실리콘층들에 인을 에너지, E=40 keV, 주입량 =  $5 \times 10^{15}$  cm<sup>-2</sup>로 이온주입한후 SIMS로 측정된 인의 농도-깊이분포(concentration-depth profile)와 900°C

에서 20분간 질소 gas 분위기에서 열처리후에 SIMS로 측정된 결과는 그림2와 3에 각각 나타내었다.



(a)



(b)

그림 1. LPCVD로 증착된 비정질 실리콘에 표면 거칠기의 측정

- (a) 도핑 되지 않은 비정질 실리콘에 인의 이온주입된 시료
- (b) 인이 도핑된 비정질 실리콘에 인이 이온주입된 시료

Fig. 1. Measurements of surface roughness in amorphous deposited by LPCVD.

- (a) Phosphorus implantation into undoped amorphous Si sample
- (b) Phosphorus implantation into P doped amorphous Si sample

그림 2에서 나타난 인이 도핑되지 않은 비정질층에 농도-깊이분포(concentration-depth profile)가 0.2  $\mu$ m 까지 거의 가우스분포를 나타낸 반면에, 인이 도핑된 비정질 실리콘층에 다시금 인이 주입된

경우 인의 이온이 되튀겨 들어가는(knock on)효과가 나타났으므로 profile-tail 부분에서 일반적으로 abrupt한 profile-tail 부분을 나타내는 가우스 분포에서 약간 벗어난 완만한 곡선으로 일정하게 인이 도핑된 비정질층과 SiO<sub>2</sub>층의 경계면까지 나타나며, 인의 도핑 때문에 첨두농도 C<sub>p</sub>(peak-concentration)의 값이 그림 2의 C<sub>p</sub> 값과 비교해보면 같은 깊이 0.0438 μm에서 각각 7.04×10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>, 1.06×10<sup>21</sup> cm<sup>-3</sup>로 서로 다르게 나타남을 알 수 있었다. 인이 도핑된 경우에는 비정질 실리콘층에 인이 1.8×10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>으로 이미 일정하게 도핑되어 있었기 때문이다. 그림 3에서 인이 도핑된 비정질 실리콘층에 인을 이온 주입한후 900℃에서 20분간 노 열처리한후 SIMS로 측정된 농도분포에서 나타난 것 처럼 노 열처리에 따른 확산 효과에 의해서 인이 1000Å의 얇은 SiO<sub>2</sub> 층을 통과하여 실리콘 기판으로 깊숙히 확산된 농도분포의 형태를 나타내었다. 이 이유는 열처리후 결정구조가 비정질층에서 다결정 실리콘(polysilicon)의 층으로 바뀌게 되는데 이때 결정립크기(grain size)를 따라서 인이 매우 빠르게 확산하기 때문이다.

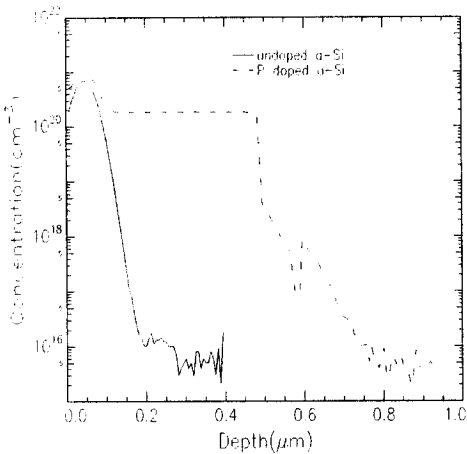


그림 2. 인이 도핑된 경우와 도핑되지않은 비정질 실리콘층에 인이 이온주입된후 측정된 SIMS 농도분포

Fig. 2. SIMS-profiles of P implantation in undoped and P doped amorphous Si layers.

4. Computer simulation 결과에 대한 고찰

R<sub>p</sub>, ΔR<sub>p</sub>, γ, β는 수직방향으로의 이온의 분포를

결정하는 range parameter들이다. 그림 3과 그림4에서 계산한 4개의 moments는 표 4.1.에 나타내었다. 표 4.1.에서 R<sub>p</sub>의 값은 인이 도핑된 경우가 도핑되지 않은 비정질 실리콘보다 표면에서 더 깊이 이동하였음을 알 수 있었다. 이것은 인이 미리 도핑된 비정질 실리콘층에 인이 다시 이온주입된 경우는 인의 이온의 연쇄적인 충돌에 의한 recoiling 효과가 나타남을 컴퓨터 모의공정 실험을 통하여 알 수 있었다. 이온의 농도분포를 모의실험하기 위해서 TRIM-code가 사용되는데, TRIM.2d는 국부적인 에너지 deposition을 나타내는 반면에, TRIM.casc는 recoil transport를 포함하고 있다. 일반적으로 질량이 무거운 이온이 가벼운 기판에 이온주입된 경우는 recoil의 이동에 대한 영향을 고려해야만 된다. 따라서 본 논문에서는 TRIM.2d와 TRIM.casc의 모의실험을 서로 비교함으로써, 그 차이가 무거운 이온인 경우 recoil motion의 영향으로 에너지-손실 depth profile이 더 깊이 target 속으로 shift하게 되고 더 측면으로 넓게 퍼지는 profile이 나타나게 된다. 그 반대로 가벼운 이온의 경우는 에너지 전달이 거의 입사된 이온에 의해서 수행된다. 입사이온이 target에 전달에너지(Transfer energy)가 변위에너지 E<sub>d</sub> 보다 더 큰 경우, 즉 T ≥ E<sub>d</sub> 인 경우에 recoil 이 일어난다. Target가 Si, SiO<sub>2</sub>인 경우에 E<sub>d</sub>의 값은 15eV로 계산한다. 또한 Boltzmann transport 방정식을 이용한 RAMM 프로그램을 이용하여 모의실험

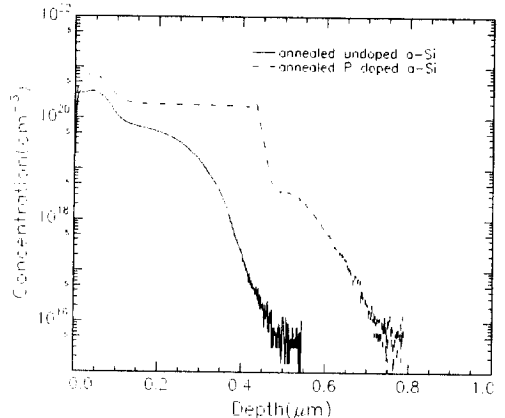


그림 3. 그림2의 농도분포를 질소 gas에서 900℃에서 20분간 노 열처리한 후의 SIMS 농도분포.

Fig. 3. SIMS profiles after furnace annealing of P implantation undoped and P doped amorphous Si layers at 900℃ with N<sub>2</sub> gas for 20 minutes.

협한 다음 Monte Carlo program인 TRIM.2d와 TRIM.casc의 결과와 서로 비교하여 표 4.2에 나타내었다. 컴퓨터 모의실험들에서는 출력 data의 통계적인(statistic) 분포를 좋게하기 위해서 입사된 이온의 개수를 50,000개로 충분하게 설정하여 계산하였다.

표 4.1. 도핑되지 않은 경우와 인이 도핑된 비정질 실리콘층에 인의 이온주입후 SIMS-profiles로부터 moments 계산.

Table 4.1. Moments calculations from SIMS-profiles of P implanted undoped and doped amorphous Si layers.

sample	$R_p(\mu m)$	$\Delta R_p(\mu m)$	$\gamma$	$\beta$
undoped a-Si	0.0478	0.0224	0.405	3.6
P doped a-Si	0.0562	0.034	0.98	3.45

표 4.2. RAMM, TRIM.2D 와 TRIM.CASC의 simulation 결과의 비교.

Table 4.2. Comparisons of simulation results from RAMM, TRIM.2d, and TRIM.casc.

model	$R_p(\mu m)$	$\Delta R_p(nm)$	$\gamma$	$\beta$	$\Delta R_L(nm)$
TRIM.2d	0.0534	21	0.06	2.61	18.7
TRIM.casc	0.0541	21.5	0.11	2.61	19.9
RAMM	0.0578	23.4	0.09	2.65	19.7

표 4.2에서  $\Delta R_L$ 는 이온이 측면방향의 분포 정도(lateral straggling)를 나타낸다. Recoiling effects의 정도는 표 4.1에서 다음의 식으로 나타내어 진다.

$$r(\text{recoiling effects의 정도}) = [R_p(\text{TRIM.casc}) - R_p(\text{TRIM.2d})] / R_p(\text{TRIM.2d}) \quad (16)$$

여기서 r의 값은 0.0131이다. 이 값은 인이 31, 실리콘이 28 amu.의 질량을 각각 가지기 때문에 약간의 질량 차이 때문에 약한 정도의 인의 recoiling effects를 나타내었다. r의 값은 target의 mass 보다 더 무거운 heavy ion 일 경우에 더 크게 나타남을

컴퓨터 모의실험을 통하여 알 수 있었다. 그림 4는 도핑되지 않은 비정질 실리콘층에 인을 이온 주입한 후 SIMS 측정 data와 여러 가지 컴퓨터 모의실험의 결과를 서로 비교하여 나타내었다. 이 결과로부터 표 4.2에 계산된 모멘트를 가지고 재구성한 농도분포는 SIMS 실험 데이터와 잘 일치함을 나타내었다. 그러나 농도분포의 아래 꼬리(tail) 부분에서는 약간의 편차를 나타내었다. 표 4.2에서 도핑되지 않은 비정질 실리콘에 인이 이온주입된 후의 계산된  $R_p(0.0478 \mu m)$ ,  $\Delta R_p(0.0224 \mu m)$  단지 두 개의 모멘트(moments) 값을 가지는 가우스 분포의 분포를 재구성하여 SIMS 결과와 비교하였는데, 대체로 실험 데이터와 잘 일치하는 편이나, 역시 농도분포의 아래부분에서 약간의 편차를 나타내었다. 그럼에도 불구하고 일반적으로 비정질 기판에 이온주입된 경우는 가파르게 떨어지는 분포의 형태를 나타내는 가우스 분포의 모델이 SIMS 데이터와 일치함을 확인할 수가 있었다. 그림 4에서는 도핑되지 않은 비정질 Si에 인의 이온주입후 SIMS 와 모의실험 결과를 서로 비교하였다. 여기서 4개의 모멘트(moments)를 가지고 재구성한 분포와 가우스 분포가 SIMS 데이터와 대체로 잘 일치하였으며, TRIM.2d 와 TRIM.casc의 데이터는 거의 비슷한 농도분포의 형태를 나타내었으며, 채널링(channeling) 효과를 고려하지 않기 때문에 농도분포의 아래부분에서 가파르게 떨어지는 분포를 나타내었다. RAMM과 TRIM(2d 와 casc.) 모의실험 데이터의 차이는 같은 ZBL(Ziegler Biersack Littmark) 전자정지력(electronic stopping power)을 사용하였으나, 서로 다른 핵정지력(nuclear stopping power)을 적용하였기 때문이다. 그림 5는 도핑되지 않은 비정질 Si에 인의 이온주입후 노 열처리후에 SIMS 와 모의실험 data를 서로 비교 하였다. 이때에 열처리 조건은 온도가 900°C에서 N<sub>2</sub> gas 분위기로 20분간이었다. 그림 5에서 나타난 것처럼 인의 농도분포 중간값의 농도에서 분포는 변형적인 현상이 나타나고 낮은값의 농도부분에서 분포는 아래로 나오는 부분이 과잉점결함(excess point defects)의 영향으로 확산효과가 증가된 변칙적인 분포의 형태가 나타난다. 인의 확산 기구에 대한 결과공 틈새기의 상호작용은 아직도 구체적으로 설명되지 않은 상태이다. 따라서 여러 가지의 이론적인 모델들을(T2d, TC, RAMM, Gauss fitting data) 적용하여 보았으나, SIMS 실험 결과와 잘 일치하지 않고 침투농도 부분과 아래의 부분에서 편차를 나타내었다. 이 이유는 아직도 인의 확산계수를 정확히 계산할 수 없었기 때문이다. 이러한 인의 확산 현상에 대하여 농도의 값이  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  이상의 부분에서 확산계

수<sup>13)</sup>는 다음과 같다.

$$D = h [ D_i^0 + D_i^- (\frac{n}{n_{ie}})^2 ] \quad (17)$$

반면에 농도가  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  이하의 부분에서 확산 계수는 다음과 같다.

여기서  $n_{ie}$ 는 유효진성캐리어 농도를  $n$ 는 전자농도를 각각 나타낸다.

$$D_{TAIL} = D_i^0 + (\frac{n_s^3}{n_e^2 n_{ie}}) \times [1 + \exp(\frac{0.3}{kT})] D_i^- \quad (18)$$

여기서  $h$ 는 증가인자(enhancement factor) 로서  $h = 1 + [1 + 4(n_s/N)^2]^{-0.5}$  의 수식으로서 표현된다.  $n_i$ 는 확산온도에서 진성캐리어농도 이고  $N$ 는 불순물농도를 의미한다.  $D_i^0, D_i^-, D_i^+, D_i^+$ 는 각각 한쌍으로된 불순물 이온과 결공의 확산계수로써, 0은 중성, -는 하나의 부전하, =는 이중 부전하, +는 하나의 양전하를 각각 나타내고 있다. 식 (17), (18)에서 나타난 것 처럼 아래 부분의 확산계수가 농도분포의 침투치부분보다 더 크다는 것을 알 수가 있다. 그리고 확산계수  $D_i$ 는 Arrhenius의 방정식으로 다음과 같이 나타난다.

$$D_i = D_0 \exp(-\frac{E_A}{kT}) \quad (19)$$

여기서  $D_0$ 는 전위장벽을 넘어가는 진동주파수에 종속된 인수이며,  $E_A$ 는 활성화에너지, 분모  $kT$ 는 볼츠만상수와 절대온도의 곱을 각각 나타낸다. 아래, 위의 2개의 부분으로 나뉘어진 경우의 확산계수를 적용하더라도 SIMS 실험 데이터와는 편차를 나타내었다. 이 이유는 주입된 인이 열처리하면 비정질 실리콘에서 다결정 실리콘으로 변하게 되는데, 온도의 증가와 더불어 결정립크기가 커지기 때문에 단결정실리콘에서 확산보다도 수십배 정도로 확산속도가 빠르게 되는데, 이 이유는 결정립크기를 따라서 빠른 확산현상이 일어나기 때문이다. 그러나 향후 여러온도 조건에서 LPCVD로 증착된 비정질층에 인을 이온주입한후 여러온도 조건에서 열처리를 하여 TEM, AFM, SIMS등의 여러 온도조건에서 광범위한 실험방법으로 계속적인 연구가 수행되면 결정립크기에 따른 확산의 기구를 규명할 수 있다고 본다. 그림 6에서는 인이 도핑되지 않은 시료와 인이 도핑된 시료에 이온주입한 경우를 비교해보면  $3.47 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  정도로 주입량 차이가 있음을 계산

하였고, 인이 표면 밖으로 확산(out diffusion)이 일어났기 때문에 표면가까이 영역에서 농도분포의 찌그러진(distortional) 형태를 나타내고 있다.

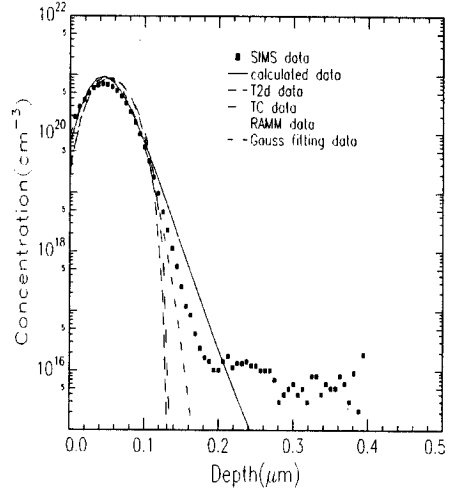


그림 4. 도핑되지 않은 비정질 Si에 인의 이온주입 후 SIMS와 simulation data의 비교  
Fig. 4. Comparisons between SIMS and simulation data after P implantation into undoped amorphous Si.

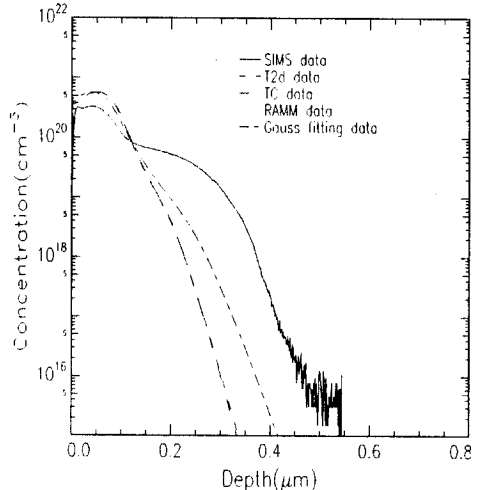


그림 5. 도핑되지 않은 비정질 Si에 인의 이온주입 후 노 열처리후에 SIMS와 simulation data의 비교.(900°C, N<sub>2</sub> gas 분위기, 20분)  
Fig. 5. Comparisons between SIMS and simulation data after furnace annealing of P implantation into undoped amorphous Si.(900°C, N<sub>2</sub> gas atmosphere, 20 min.)

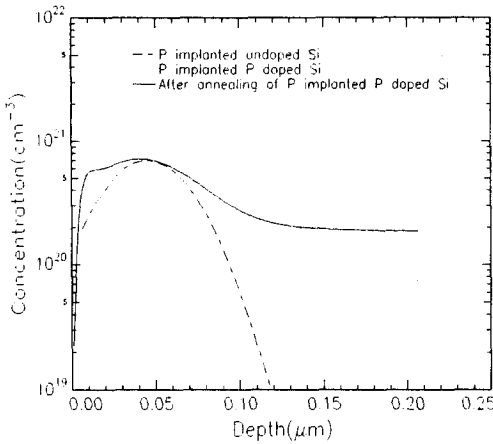


그림 6. 인의 이온주입후 SIMS data와 노 열처리한 sample들의 측정된 SIMS data 비교. (900°C, N<sub>2</sub> gas 분위기, 20분)

Fig. 6. Comparisons of measured SIMS data between P implanted and furnace annealed samples.(900°C, N<sub>2</sub> gas atmosphere, 20 min.)

그림 7의 (a)는 도핑되지 않은 비정질 실리콘에 인을 이온주입한 경우 2차원적인 인의 농도분포를 나타내고 있고 (b)는 온도 900°C, 질소가스 분위기

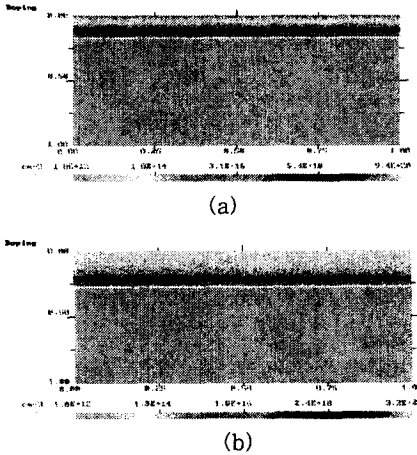


그림 7. 도핑되지 않은 실리콘 기판에 인이 이온 주입된 경우의 열처리전과 열처리후의 (900°C, 20분간 질소가스분위기) 2차원적인 농도분포 모의실험결과

Fig. 7. Simulation result of Phosphorus implanted in undoped silicon and annealed samples. (900°C, N<sub>2</sub> gas atmosphere, 20 min.)

에서 20분간 열처리후의 인의 농도분포를 나타내고 있는데, 그림 (a)는 표면에서 0.1 μm까지 4×10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>의 농도의 인이 열처리후에는 그림 (b)처럼 표면에서 0.2 μm까지 더 깊이 확산되었음을 알 수 있다.

그림 8의 (a)는 표면에서 0.1 μm까지 1×10<sup>21</sup> cm<sup>-3</sup>의 인의 농도로 분포되어 있다가 열처리후에는 그림 (b)와 같이 표면에서 0.25 μm까지 1×10<sup>21</sup> cm<sup>-3</sup>의 인의 농도가 분포되어 있음을 확인할 수가 있었다. 0.3 μm까지 2.7×10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>의 인의 농도가 나타남을 알 수 있었다..

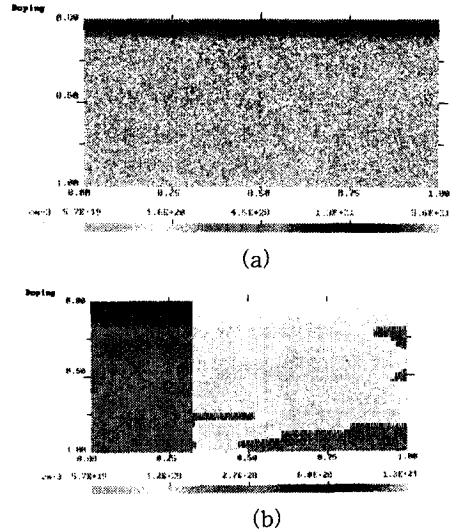


그림 8. 인이 도핑된 실리콘 기판에 인이 이온주입된 경우의 열처리전(a)와 열처리후(b)의 (900°C, 20분간 질소가스분위기) 2차원적인 농도분포 모의실험결과

Fig. 8. Simulation result of Phosphorus implanted in Phosphorus doped silicon and annealed samples.(900°C, N<sub>2</sub> gas atmosphere, 20 min.)

### 5. 결 론

현재 많은 반도체 제작사들은 620°C 이상의 온도의 공정기술을 적용하고 있으나, 본 논문에서는 저온인 531°C 에서 균일도가 좋은 LPCVD 방법으로 비정질층을 증착하여 강하게 도핑된 다결정층을 만들기 위해서 인을 이온주입하였다. 580°C 아래에서 증착된 비정질 실리콘층들은 표면이 매끄러운 반면에 620°C 이상의 높은 온도에서 증착된 다결정 실리콘층들은 결정립의 크기가 크지기때문에 거친 표면구

조를 나타냄을 본 논문에서 AFM 측정을 통하여 확인할 수 있었으며, 인이 도핑되지 않은 경우와 도핑된 경우에 표면거칠기의 실효값 rms(root mean square)는 각각 7.17Å, 6.65Å를 나타내었다. 이것은 인이 도핑되지 않은 경우가 도핑된 경우보다 표면의 거칠기가 더 크다는 것을 나타내는데, 이 이유는 인이 도핑된 경우에 N<sub>2</sub> gas를 사용하였기 때문이라고 사료된다. 인이 비정질 실리콘층에 이온주입되면 일반적으로 가파른 가우스 분포를 나타내지만, 본 실험에서 증착된 비정질 실리콘의 결정립의 크기가 그림2의 AFM의 측정과정에서 수 Å에서 수십 Å의 크기를 나타내었기 때문에 아마도 결정립 크기의 경계를 따른 채널링(channeling) 효과가 나타났으리라고 사료되기 때문에 여러 가지의 이론적인 모델(model)들과 약간의 편차를 나타내었으며, 그림 6에서는 인이 도핑되지 않은 시료와 인이 도핑된 시료에 이온주입한 경우를 비교해보면  $3.47 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  정도로 주입량(dose) 차이가 있음을 계산하였고 인의 이온주입에 의한 모멘트의 계산된 값을 처음으로 표 4.1에 나타내었고, 인의 recoiling effect의 정도(r) 0.0131을 컴퓨터 모의실험을 통하여 계산하였다. 본 실험에서는 인과 실리콘의 약간의 질량 차이 때문에 인의 recoiling effects가 약하게 나타났으며, 전기적인 활성화(electrical activation)을 위해서 본 논문에서 900°C에서 20분간 질소가스 분위기에서 열처리한후 SIMS 측정과 모의실험 결과들을 그림 5에 서로 비교하였으나 침투농도 영역 부분에서 약간의 편차와 농도분포의 아래 부분에서 큰 편차를 나타내었다. 이 이유는 열처리동안에 비정질에서 다결정층으로 변하게 되는데, 이때에 결정립 경계를 따른 인의 확산 기구(mechanism)가 아직까지 정확하게 규명되지 못했기 때문이다. 그 이유는 온도에 따라서 결정립의 크기가 다르고 그 경계를 따른 확산속도도 다르기 때문이다. 그림 7과 8에 microtec 모의실험을 통하여 본 논문에서 처음으로 2차원적인 인의 농도분포를 열처리 전과후의 농도 분포를 확인할 수가 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. S. A. Campbell, "The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication", Oxford University Press, 1996
2. D. Widmann, H. Mader, H. Friedrich, "Technologie hochintegrierter Schaltungen", Springer, 1996
3. W. A. Bryant, "The Kinetics of the Deposition of Silicon by Silane Pyrolysis at Low Temperatures and Atmospheric Pressure", Thin Solid Films, 60, 19, 1979
4. C. H. J. Van Den Brekel and L. J. M. Bollen, "Low Pressure Deposition of Polycrystalline Silicon from Silane", J. Cryst. Growth, 54, 310, 1981
5. T. I. Kamins, M. M. Mandurah, and K. C. Saraswat, "Structure and Stability of Low Pressure Chemically Vapor-Deposited Silicon Films", J. Electrochem. Soc., 125, 927, 1978
6. T. I. Kamins, "Structure and properties of LPCVD Silicon Films", J. Electrochem. Soc., 127, 686, 1980
7. M. M. Mandurah, K. C. Saraswat, and T. I. Kamins, "Phosphorus Doping of Low Pressure Chemically Vapor-Deposited Silicon Films", J. Electrochem. Soc., 126, 1019, 1979
8. M. M. Mandurah, K. C. Saraswat, C. R. Helms, and T. I. Kamins, "Dopant Segregation in Polycrystalline Silicon", J. Appl. Phys., 51, 5755, 1980
9. G. Yaron, "Characterization of Phosphorus Implanted Low Pressure Chemical Vapor Deposited Polycrystalline Silicon", Solid State Electron., 22, 1017, 1979
10. H. Ryssel, J. Lorenz, and W. Krüger, "Ion Implantation into non-planar targets: Monte Carlo Simulations and analytical models", Nucl. Inst. Meth. B19/20, 45, 1987
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, pp. 257, 1980
12. W. Eckstein, "Computer Simulation of Ion-Solid Interactions", Springer-Verlag, 1991
13. User's Guide ICECREM 1992, Fraunhofer Arbeitsgruppe für Integrierte Schaltungen Artilleriestrasse 12-14, 8520 Erlangen, Germany
14. M. S. Obrecht, "A new stable method for linearization of discretized basic semiconductor equations", Solid State Electronics, Vol. 36 No. 4 pp.643-648, 1993