

열처리 조건에 따른 이온주입된 실리콘의 재결정화

이창희 · 이순일

아주대학교 물리학과
(1995년 9월 25일 접수)

Thermal Annealing Condition Dependence of Ion-implanted Silicon Recrystallization

Chang Hee Lee and Soonil Lee

Department of Physics, Ajou University, Suwon 442-749, Korea
(Received September 25, 1995)

요 약 - 이온주입된 실리콘 시료들의 열처리 조건에 따른 재결정화를 분광 타원해석법(Spectroscopic Ellipsometry, SE)을 사용하여 연구하였다. 열처리 후에도 잔류하는 결함들의 양과 분포를 구하기 위한 시료의 층구조 분석에 있어서 손상층의 유효굴절율은 Bruggeman 유효매질이론을 이용하여 구하였으며 기준 비정질실리콘 데이터로서는 완화된 비정질실리콘의 광학상수와 이온주입에 의해서 만들어진 비정질 실리콘의 광학상수를 함께 사용하였다. 조사된 대부분의 열처리 조건하에서 고체상 적층성장(solid-phase epitaxial growth) 과정에 따라 비정질층이 재결정화되는 것이 관측되었다.

Abstract - Thermal annealing condition dependence of ion-implanted silicon recrystallization is studied using spectroscopic ellipsometry. In depth profiling the annealed silicon to determine the residual damage, we used both the relaxed amorphous silicon reference data and implanted amorphous reference data with the Bruggeman effective medium theory. All the samples that we studied were found to recrystallize due to the solid-phase epitaxial growth under our annealing conditions.

1. 서 론

반도체에 불순물을 첨가하는 방법 중 고온확산의 대안으로 널리 쓰이고 있는 이온주입(ion implantation) 방법은[1-3] 3~500 keV의 에너지로 가속된 붕소(B, boron), 인(P, phosphorus), 비소(As, arsenic) 등의 이온을 실리콘에 조사하여 표면에서 100~10,000 Å 정도까지 원하는 깊이에 첨가할 수 있고 주입이온의 농도를 정확하게 제어할 수 있으며 비교적 저온에서 수행되기 때문에 첨가물의 확산이 적다는 장점을 가지고 있다. 또한 열처리 과정을 거쳐 대략 10^{14} ~ 10^{21} atoms/cm³의 첨가물 농도(dopant concentration)와 깊이 분포를 훌륭하게 제어할 수 있으며 진공중에서 이루어지기 때문에 비습식(dry) 청정공정(clean process)이고 VLSI 제작시 감광성 내식막(photoresist), 산화물, 질화물, 다결정실리콘 등과 같이 어

떠한 재료로도 마스크를 만들 수 있다는 것도 장점이다.

이와 같은 이온주입과정에는 주입이온과 격자원자간의 충돌로 인하여 결정영역이 무질서해지거나 비정질화하게 되어 반도체의 전기적 성질(electrical property)을 변화시키는 부작용이 따르게 된다[1-3]. 따라서 이온주입에 의한 이온의 첨가 후에는 결정구조를 회복시키기 위해 반드시 열처리를 해주어야 한다.

최근에는 이온주입(Ion Implantation)된 반도체를 광학적인 측정 방법(reflection[4, 5], absorption[6], ellipsometry[7-10], Raman spectroscopy[11], modulation spectroscopy[12] 등)을 사용하여 분석, 연구하는 일이 증가하고 있다. 광학적 측정은 간편하고 비파괴적인 분석 방법으로, 모든 종류의 첨가물과 반도체에 응용이 가능하며 또한 빛의 침투깊이가 파장에 따라 달라지는 점을 이용하면 이온주입된 표면에서부터 원하는 깊이까지의

조사도 가능하다. 본 연구에서는 시료표면에서 반사한 빛의 편광상태의 변화를 분석함으로써 시료의 다층박막 구조 또는 시료 구성물질의 광학적 상수들을 알아내는 분광타원해석법(Spectroscopic Ellipsometry, SE)을 이용하여, 열처리 조건에 따라 나타나는 실리콘 손상층의 재결정화 정도를 분석하였다. 널리 쓰이고 있는 XTEM [13, 14]이 파괴적이며 시료준비에 많은 노력이 필요한데 비하여 분광타원해석법은 비파괴적, 비간섭적이며 측정이 간편하여 *in-situ* 혹은 *on-line* 측정도 가능하다.

이 연구에서는 분광타원해석 스펙트럼의 분석에 기존의 완화된 비정질실리콘 기준데이터(*relaxed amorphous silicon reference data*, 약칭하여 *r-a-Si*라 표기함)와 함께 이온주입된 비정질실리콘 기준데이터(*ion-implanted amorphous silicon reference data*, *i-a-Si*라 표기함)를 사용하여[15-17] 실제 반도체의 도핑에 많이 사용되는 As^+ , P^+ , BF_2^+ 들이 이온주입된 시료들에 대한 분석의 정확도를 향상시켰다.

2. 타원해석법

타원해석법의 기본식들은 Maxwell 방정식으로부터 광파의 계면에서의 경계조건을 반사광의 편광상태와 연결하여 적용함으로써 유도할 수 있다. 매질과 기저층으로 이루어진 2상계에서의 반사를 고려하면, 전기장이 입사면에 나란한 방향으로 진동하는 경우(p파)와 전기장이 입사면에 수직인 방향으로 진동하는 경우(s파)의 각각에 대해서 Fresnel 반사계수는

$$r_p = \frac{E''_{op}}{E_{op}} = \frac{n_o \cos \theta' - \bar{n}' \cos \theta_o}{n_o \cos \theta' + \bar{n}' \cos \theta_o} \quad (1)$$

$$r_s = \frac{E''_{os}}{E_{os}} = -\frac{n_o \cos \theta' - \bar{n}' \cos \theta'}{n_o \cos \theta' + \bar{n}' \cos \theta'} \quad (2)$$

이다[18-21]. 여기서 θ_o 와 θ' 은 각각 입사각과 굴절각이며 n_o 는 매질의 굴절율, $\bar{n}' = n - ik$ 은 기저층의 복소굴절율이며 n 은 굴절율(refractive index)이고 k 는 소광계수(extinction coefficient)이다. 타원해석법에서 직접 측정하는 양은 반사에 따른 p파와 s파의 반사계수의 비인데, 일반적으로 복소수인 이 값을 다음 식과 같이 분광 타원해석상수 Δ 와 ψ 로써 표현한다[19, 21].

$$\rho = \tan \psi e^{i\Delta} = \frac{r_p}{r_s} \quad (3)$$

여기서 Δ 와 ψ 는 각각 $0 \sim 360^\circ$, $0 \sim 90^\circ$ 의 범위를 갖는 실

수각으로서 $\tan \psi$ 는 반사에 따른 p파와 s파의 진폭의 비 Δ 는 반사에 따른 p파와 s파의 위상변화의 차를 가리킨다. 이같은 Δ 와 ψ 의 표현은 2상계 뿐만 아니라 다중박막시료에서도 p파와 s파의 반사율의 비로 동일하게 정의된다.

회전검광자형의 타원해석기가 이상적인 부품들로 이루어져 있을 경우 측정되는 광의 세기는 회전편광자의 각도(P)의 함수로써 다음 (4)식과 같이 표현되며 이식의 푸리에 계수인 (α_o, β_o) 와 검광자의 각도(A)로써 타원해석상수를 $\tan \psi$, $\cos \Delta$ 의 형태로 식 (5), (6)와 같이 나타낼 수 있다[22-24].

$$I(P) = I_o(1 + \alpha_o \cos 2P + \beta_o \sin 2P) \quad (4)$$

$$\tan \psi = \tan A \sqrt{\frac{1 + \alpha_o}{1 - \alpha_o}} \quad (5)$$

$$\cos \Delta = \frac{\beta_o}{\sqrt{1 - \alpha_o^2}} \quad (6)$$

본 실험에 사용된 타원해석기는 광량측정방식으로 구체적으로는 회전편광자(Rotating Polarizer, RP)형 타원해석기이다. 그 측정영역은 대략 가시광선대역(1.5~4.1 eV)이고 입사각을 바꾸어 줄 수 있다. 광원은 가능한 넓은 영역에서 고른 세기분포를 보여주는 Xe 고압 방전램프를 사용했다. 편광자 및 검광자는 단결정 Glan Taylor Prism을 사용했다. 단색분광기는 회절격자형이고 컴퓨터와 연결되어 자동화되어 있으며 검광자와 광측정장치 사이에 위치한다. 편광자는 동기화된 직류모터를 사용하여 회전시키고 검광자는 스텝핑모터로 구동시켰으며 광증배관을 사용하여 편광자의 회전각에 따르는 빛의 세기를 측정하였다. 실제 타원해석기에 사용된 부품들은 미소결함을 지니고 있으므로 이들의 미소결함에서 비롯된 편차들을 보정해 주어야 한다. 본 연구에서는 배경직류세기의 가감[23], 보정(calibration) 과정[22] 등을 통해서 그 편차의 영향을 극소화한 후 측정을 시작하였다.

3. 모델링과정

모델링(modelling) 과정이란 타원해석기에서 측정된 데이터를 분석하여 박막의 미지상수들, 즉 각 박막의 두께, 박막내 각 성분의 조성비 등을 결정하는 일련의 과정을 말한다. 이러한 모델링과정은 다중박막의 두께, 구성성분의 조성비 등을 미리 추정하고 이 추정된 다중박

막상수에 의한 스펙트럼을 실험으로 구해진 스펙트럼과 비교하면서 그 차이를 줄여가는 간접적인 방법이다. 모델링과정의 구체적인 방법은 D. E. Aspnes[25]에 의해 시도된 바와 같이 오차[21, 26]를 극소화하는 과정에서 보여진다.

$$\sigma = \frac{1}{N-p-1} \left[\sum_{i=1}^N |(\alpha_{i,cal} - \alpha_{i,exp}^2 + (\beta_{i,cal} - \beta_{i,exp}))^2|^{1/2} \right] \quad (7)$$

여기서 N 은 실험 data의 갯수, p 는 미지상수의 갯수 그리고 α 와 β 는 타원해석법에서 회전편광자의 각도의 함수로써 측정되는 광의 세기의 푸리에 계수이다. 타원 해석 관련식들은 극도로 비선형적이므로 이 오차함수를 극소화할 수 있는 일반적인 해석적인 방법이 없기 때문에 이 오차함수를 극소화하는 데는 많은 현실적인 어려움이 있다. 그 해결책으로 먼저 합리적인 범위내에서 각 상수에 대한 격자탐사(grid search)를 행한 다음 오차함수가 최소가 되는 격자점(mesh point)에서 선형회귀분석법(linear regression analysis)을 적용한다. 이 모델링과정은 컴퓨터의 도움을 받아 행하였다[24-26].

본 연구의 모델링과정에서 특기할 만한 점은 비정질 실리콘 기준데이터로써 일반적으로 사용되는 D. E. Aspnes의 비정질실리콘(r-a-Si)의 광학상수와 이온주입에 의해서 만들어진 비정질실리콘(i-a-Si)의 광학상수를 구분하여 사용함으로써 이온주입시료들에 대한 분석에 있어서의 정확도를 향상시킨 점이다. 비정질은 그 구조나 물리적 성질이 매우 다양하고 복잡하여 한 가지로 정형화시킨다는 것이 불가능하다. 그러나 그 특성은 여러 분야에서 매우 유용하므로 이미 오래 전부터 관심의 대상이 되어 왔고, 특히 비정질실리콘은 그 이용가치가 높아서 제작방법, 응용방법, 특성 등에 대해 이미 많은 연구가 진행되어 있는 상태이다. 최근에 들어서는 M. Fried, T. Lohner 등에 의해 이온주입에 의해서 만들어진 비정질실리콘(i-a-Si)의 성질과 완화된 비정질실리콘(r-a-Si)의 성질이 서로 다르다는 것이 밝혀진 바 있다[15-17].

그림 1에 결정질실리콘과 비정질실리콘의 복소유전함수를 중 몇개를 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 이온주입된 비정질실리콘(i-a-Si)과 완화된 비정질실리콘(r-a-Si)의 복소유전함수는 구조적 차이에서 기인한 명확한 광학적차이를 보여준다. c-Si의 유전함수는 실리콘의 직접에너지 띠허격에 해당하는 3.4 eV에서 특징적인 광흡수 피크(ϵ_2 absorption peak)를 보인다. 이 광흡수 피크는 실리콘결정의 존재를 확인하여 주어 비정질에

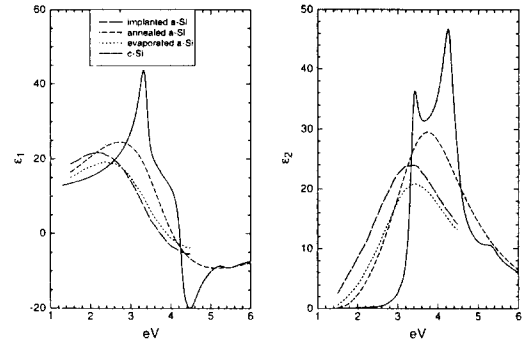


그림 1. 결정질실리콘과 진공증착된 비정질실리콘(e-a-Si), 이온주입된 비정질실리콘(i-a-Si), 그리고 완화된 비정질실리콘(r-a-Si)의 복소유전함수.

가까와 질수록 무디어지고 낮은 에너지쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 즉 i-a-Si쪽이 r-a-Si보다 더 비정질화되어 있고 더 많은 무질서가 존재한다고 할 수 있다. 이렇게 복소유전함수 자체가 차이를 보이므로 i-a-Si와 r-a-Si를 사용하여 모델링한 결과 역시 뚜렷한 차이를 보이게 된다.

열처리를 거치지 않은 as-implanted 시료의 분석에는 i-a-Si가, 열처리 후의 시료 분석에는 r-a-Si가 더 좋은 결과를 나타내는데 이 역시 이온주입에 의한 비정질 실리콘 데이터와 완화된 비정질 실리콘 데이터의 광학적 특성이 다르다는 것을 나타낸다.

4. 실험 결과 및 논의

시료들은 실리콘에 각각 As^+ , P^+ , BF_2^+ 이온들을 40 keV의 이온주입에너지로 $\sim 10^{15}$ ions/cm² 정도 주입한 뒤 여러 가지 조건하에서 열처리를 하였는데, 이온주입 및 열처리 조건들을 표 1에 정리하였다.

그림 2는 as-implanted 시료(8, 18, 28번 시료)들의 타원해석 스펙트럼과 i-a-Si(실선) 및 r-a-Si(점선)으로 각각 최적근사한 타원해석 스펙트럼을 비교한 그림이다. 실선이 점선보다 측정값에 더 가까움을 볼 수 있는데 이는 r-a-Si의 밀도(density)나 균일성(homogeneity)이 이온주입에 의해 만들어지는 비정질층과 다르다는 것을 나타낸다. 또한 점선이 실선보다 더 진동하는 변화형태를 보이는데 이는 r-a-Si의 그래프가 i-a-Si에 비하여 높은 에너지영역으로 이동하여 (blue-shift) 낮은 에너지영역에서 흡수계수가 작기 때문인 것으로 설명된다. 8, 18, 28번 시료들은 실리콘에 각각 As^+ 이온을 4.5×10^{15} ions/cm²,

표 1. 실리콘 시료들의 이온주입 및 열처리 조건들

| 주입이온 종류 | 에너지 (keV) | 주입량 (ion/cm ²) | 시료번호 | 열처리 조건(온도, 시간, 분위기 가스) | | |
|-------------------------------|--------------|-------------------------------|------|------------------------------|--|------------------------------|
| | | | | 1차 | 2차 | 3차 |
| As ⁷⁵ | 40 | 4.5 × 10 ¹⁵ | 8 | as implanted (not annealed) | | |
| | | | 5 | 900℃, 30 min, N ₂ | 1050℃, 30 sec, N ₂ (90%), O ₂ (10%) | 850℃, 30 min, N ₂ |
| | | | 3 | 900℃, 30 min, N ₂ | 1000℃, 60 sec, N ₂ (90%), O ₂ (10%) | 850℃, 30 min, N ₂ |
| | | | 2 | 900℃, 30 min, N ₂ | 1000℃, 60 sec, N ₂ (90%), O ₂ (10%) | 800℃, 30 min, N ₂ |
| P ³¹ | 40 | 2.0 × 10 ¹⁵ | 18 | as implanted (not annealed) | | |
| | | | 16 | 750℃, 30 min, N ₂ | — | — |
| | | | 12 | 750℃, 30 min, N ₂ | 950℃, 30 sec, N ₂ (90%), O ₂ (10%) | 750℃, 30 min, N ₂ |
| | | | 10 | 750℃, 30 min, N ₂ | 950℃, 30 sec, N ₂ (90%), O ₂ (10%) | 650℃, 30 min, N ₂ |
| BF ₂ ⁴⁹ | 40 | 1.0 × 10 ¹⁵ | 28 | as implanted (not annealed) | | |
| | | | 22 | 750℃, 30 min, N ₂ | 950℃, 30 sec, N ₂ (90%), O ₂ (10%) | 750℃, 30 min, N ₂ |

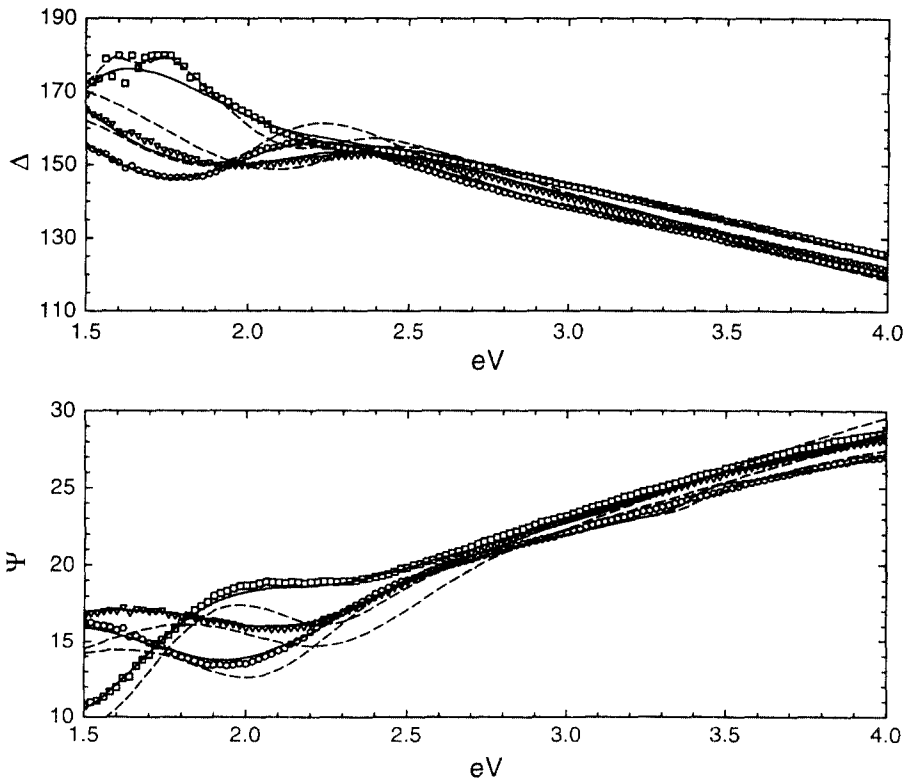


그림 2. 각각 P³¹(□), As⁷⁵(○), BF₂⁴⁹(▽) 이온이 40 keV의 에너지로 주입된 실리콘시료들의 타원해석상수 스펙트럼들과 이온 주입된 비정질실리콘(i-a-Si)의 복소유전함수를 사용한 최적 모델링 스펙트럼들(—), 그리고 완전된 비정질실리콘(r-a-Si)의 복소유전함수를 사용한 최적 모델링 스펙트럼들(---)의 비교.

P^+ 이온을 2.0×10^{15} ions/cm², BF_2^+ 이온을 1.0×10^{15} ions/cm²의 조사량으로 주입한 시료들로서, 이온주입 에너지는 공통적으로 40 keV 이다. 분석 결과는 이 시료들에 모두 비정질 층이 생성된 것을 보여주고 있는데, 이

때의 비정질화 정도의 이온주입 조건 의존성에 관해서는 이미 다른 논문에서 자세히 논의한 바가 있다[27]. 이러한 as-implanted 시료의 최적 모델링 결과를 표 2에 요약해 놓았다.

표 2. 이온주입 및 열처리된 실리콘 시료들의 분광타원분석법에 의한 표면층의 구조분석표. 타원분석 모델링에 사용된 광학적 박막구조는 공기(매질)/제 1박막층/제 2박막층/c-Si(기저층)임

| 시료번호 | 표면층 | | 제 1박막층 | | 제 2박막층 | | 광학모델 | σ |
|------|---------------------------|-------|--------------|-------|-------------|-------|------|----------|
| | 조성(%) | 두께(Å) | 조성(%) | 두께(Å) | 조성(%) | 두께(Å) | | |
| 8 | SiO ₂ +cSi(45) | 25 | iaSi+cSi(11) | 310 | iaSi | 282 | I* | 0.013 |
| 5 | SiO ₂ (25)+cSi | 76 | - | - | - | - | B | 0.024 |
| 3 | SiO ₂ | 72 | cSi+raSi(31) | 72 | cSi+raSi(8) | 336 | R* | 0.007 |
| 2 | SiO ₂ | 35 | cSi+raSi(7) | 121 | - | - | R | 0.018 |
| 18 | SiO ₂ | 4 | iaSi | 940 | - | - | I | 0.014 |
| 16 | SiO ₂ | 30 | cSi+raSi(5) | 104 | - | - | R | 0.011 |
| 12 | SiO ₂ | 16 | raSi | 15 | cSi+raSi(8) | 339 | R* | 0.010 |
| 10 | SiO ₂ (23)+cSi | 60 | - | - | - | - | B | 0.015 |
| 28 | SiO ₂ +cSi(29) | 14 | iaSi+cSi(4) | 519 | - | - | I | 0.011 |
| 22 | SiO ₂ | 26 | cSi+raSi(11) | 36 | - | - | R | 0.011 |

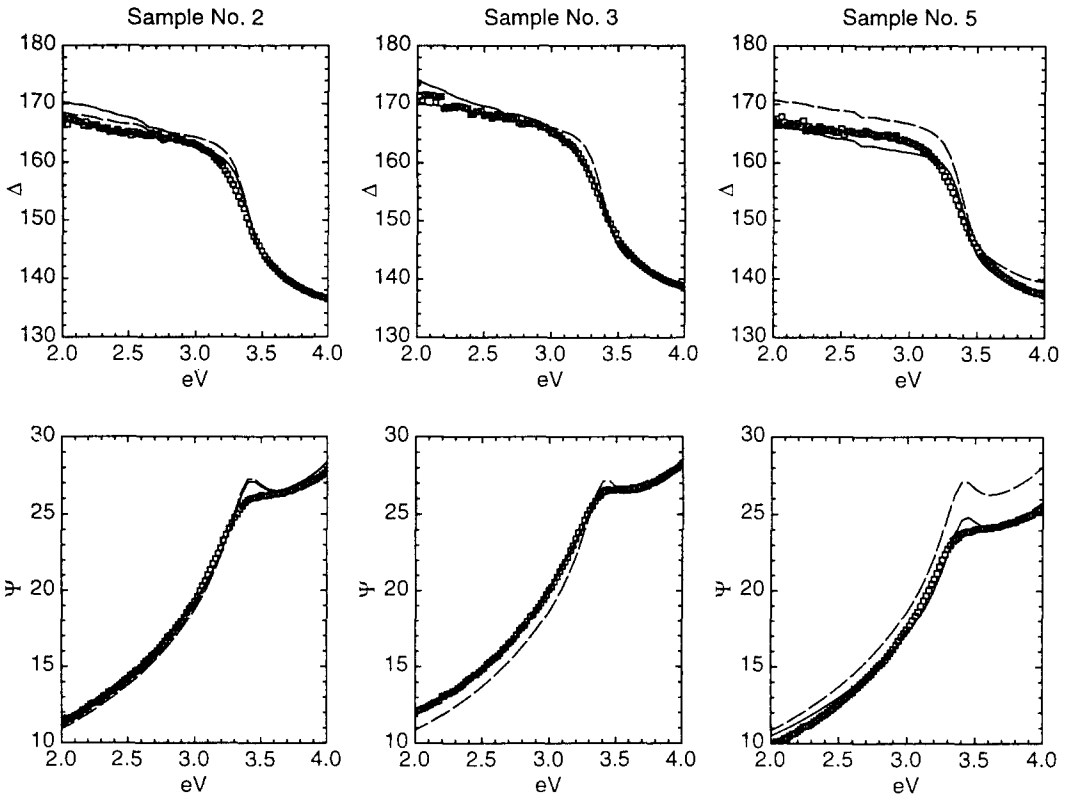


그림 3. As⁺ 이온이 주입된 시료를 열처리한 후 측정된 분광 타원분석상수 스펙트럼들(□)과 C model을 이용하여 모델링한 스펙트럼들(---), 그리고 최적 모델링 스펙트럼들(—).

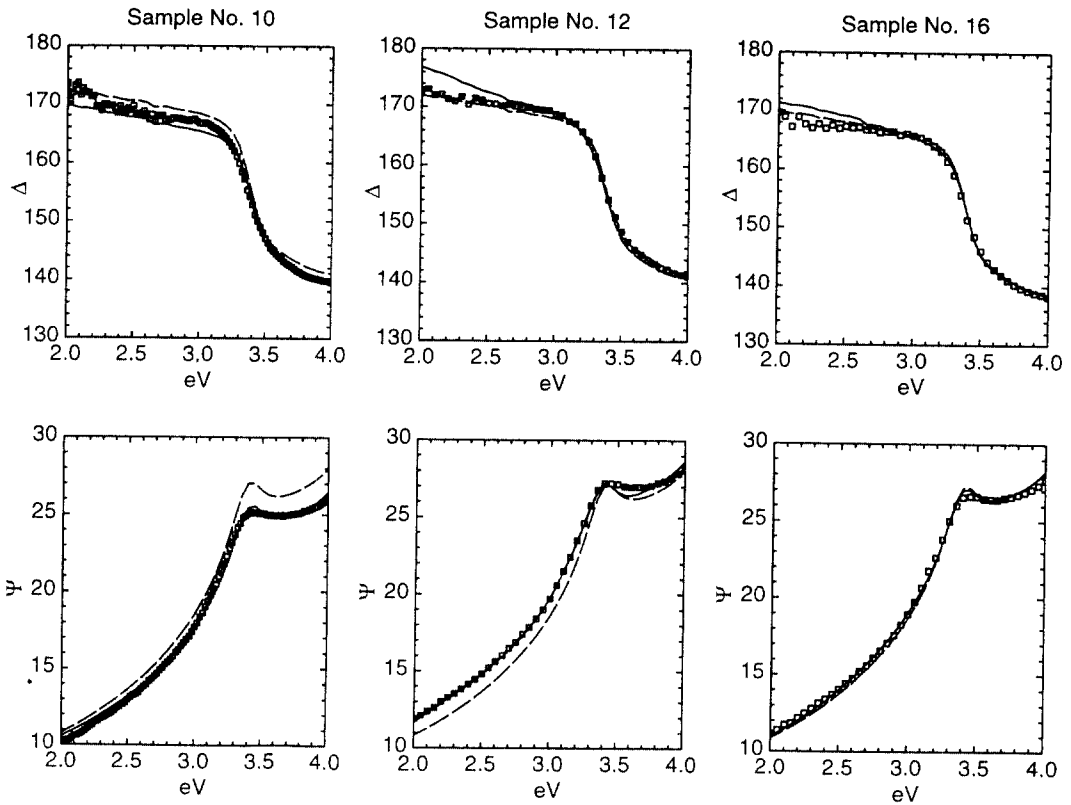


그림 4. P⁺ 이온이 주입된 시료를 열처리한 후 측정된 분광 타원해석상수 스펙트럼들(□)과 C model을 이용하여 모델링한 스펙트럼들(---), 그리고 최적 모델링 스펙트럼들(—).

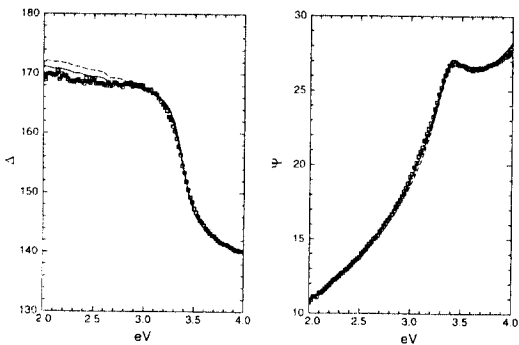


그림 5. BF₂⁺ 이온이 주입된 시료를 열처리한 후 측정된 분광 타원해석상수 스펙트럼들(□)과 C model을 이용하여 모델링한 스펙트럼들(---), 그리고 최적 모델링 스펙트럼들(—).

그림 3~5는 그림 2의 as-implanted 시료들을 열처리한 후의 분광 타원해석 스펙트럼들이다. 2, 3, 5번 시료들은 As⁺ 이온을, 10, 12, 16번 시료들은 P⁺ 이온을, 그

리고 22번 시료는 BF₂⁺ 이온을 이온주입한 후, 표 1에 나타낸 조건들에 따라 열처리 한 시료들이다. 이 분광 타원해석 스펙트럼들을 그림 2의 스펙트럼들과 비교해 보면, 상당한 양의 비정질층이 있는 경우인 그림 2의 스펙트럼들과는 형태가 다른 것을 볼 수 있다. 즉, 이온주입시 비정질 영역이 형성되었던 시료들의 열처리에 따른 재결정화 여부는 분광 타원해석 스펙트럼의 형태만으로도 쉽게 구분할 수 있다. 또한 열처리 조건에 따른 재결정화 정도의 차이를 분석하기 위하여 다음과 같은 몇 가지 광학적 모델들을 정하고, 이들을 이용하여 모델링 했을때의 오차(unbiased estimator, σ)의 값을 표 3에 정리하여 보았다. 이 광학적 모델들은 평균모델로써 비정질화된 정도가 비슷한 층들이 이웃하였을 경우 이들 층을 합쳐 하나의 평균층으로 대체하여 가능한한 층의 개수를 줄이는 방향으로 결함의 깊이분포를 반영하였다.

① I model : SiO₂ (+c-Si)/i-a-Si (+c-Si)/c-Si

I* model : $\text{SiO}_2 + \text{c-Si}/\text{i-a-Si} + \text{c-Si}/\text{i-a-Si}/\text{c-Si}$

② R model : $\text{SiO}_2/\text{r-a-Si} + \text{c-Si}/\text{c-Si}$

R* model : $\text{SiO}_2/\text{r-a-Si} + \text{c-Si}/\text{r-a-Si} + \text{c-Si}/\text{c-Si}$

③ B model : $\text{SiO}_2 + \text{c-Si}/\text{c-Si}$

④ C model : $\text{SiO}_2/\text{c-Si}$

I와 I* model은 as-implanted 시료의 비정질화를 나타내는 모델이며, R과 R* model은 완전하게 열처리되지 않았을 경우에 남아 있는 비정질층과 기타 결함들을 고려하기 위한 모델이다. B model은 열처리에 의해 재결정화가 거의 이루어진 경우를 나타내는데 표면층은 실제로 c-Si와 SiO_2 가 섞인 것이라기 보다는 일반적으로 열처리 후에도 표면 근방에 남은 결함들의 광학적 효과를 나타내기 위한 것이다. C model은 결정 실리콘 위에 산화층만이 존재한다고 가정된 모델이므로 열처리가 이상적으로 이루어진 경우를 나타낸다. 그림 3~5에는 최적 모델링 결과(실선)들과 함께 C model을 이용하여 모델링한 결과(점선)들도 표시하였다. 위의 모델들을 사용한 모델링 결과의 값만 가지고도 열처리 효과들을 비교할 수 있다. 예를 들어 표 3에서 보면 As^+ 주입된 5번 시료와 P^+ 주입된 10번 시료가 B model을 이용하여 최적 모델링되므로, 이 시료들이 상대적으로 재결정화가 잘 된 것을 알 수 있다.

표 2에는 각 시료들의 최적 모델링 때의 층구조 분석 결과를 정리하여 놓았다. 이표에서 보면 열처리 전에는 수 백 Å이던 비정질층들의 두께가 열처리 후에는 재결정화가 일어나 현격히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 as-implanted 시료의 제 2막층이 없어지고 제 1막층이 얇아지는 사실로부터 열처리된 시료의 재결정화는 표면쪽으로부터 내부로 진행되는 것이 아니라 결정

성 실리콘과 접하고 있는 계면쪽으로부터 시작하여 표면쪽으로 고체상 적층성장(solid phase epitaxial growth) 과정에 의하여 이루어짐을 알 수 있다. 재결정화가 가장 잘된 5번과 10번 시료와의 다른 열처리된 시료들의 최적 모델링 결과에는 모두 비정질 실리콘이 포함되는데, 이 때의 비정질 실리콘은 as-implanted 시료의 분석에 쓰인 이온주입된 비정질 실리콘과는 달리 완화된 비정질 실리콘으로 이 역시 열처리 효과가 있음을 잘 보여주고 있다. 3번과 12번 시료는 재결정화가 잘 안되었는데, 이는 열처리 조건보다는 이온 주입시 만들어진 결함의 차이 때문이 아닌가 생각된다. 이 두 시료는 R model의 r-a-Si + c-Si층을 두 개로 나눈 R* model의 경우에 가장 작은 σ 값을 나타내는데 이는 열처리 후에도 약간의 비정질층과 결함이 남아 있다는 것을 암시해 준다. 즉, 표면 산화층 아래 비정질 영역이 있고 또 그 아래에 결함 영역이 있는데, 이는 열처리에 의해 고체상 적층성장 과정이 진행된 후에도 남은 넓은 어긋나기(dislocation)들 때문일 것으로 추측된다. 어긋나기층의 열처리가 비정질층의 열처리보다 비효율적이라는 사실은 잘 알려져 있다[1]. 열처리 조건이 동일한 12번과 22번 시료의 재결정화도 차이를 나타내고 있는데, 이 역시 P^+ 이온과 BF_2^+ 이온이 주입시 만든 결함의 차이를 반영하고 있다고 생각된다. 2번, 16번, 그리고 22번 시료는 표면 산화층 아래에 각각 121, 104, 36 Å 두께의 7.41, 5.17, 11.19%의 r-a-Si 함유량을 가진 c-Si층이 존재하고 있는데 이는 각 시료들의 표면쪽에 존재하는 소량의 결함들의 광학적 효과를 나타내기 위한 것이다. 이 시료들의 잔류 결함은 매우 작은 양으로 표 3에서 확인할 수 있는 것처럼, 이 시료들은 C model이나 B model로 모

표 3. 각 시료의 분석에 사용된 모델에 따른 σ 값의 비교. *는 각기 R*와 I* 모델을 나타내며, x는 모델링이 안되는 경우를 나타낸다

| 시료번호 | 광학모델 | σ (Unbiased estimator) | | | |
|------|------|-------------------------------|-------------|-------------|---------|
| | | C model | R(R*) Model | I(I*) model | B model |
| 2 | | 0.027 | 0.018 | 0.050 | 0.026 |
| 3 | | 0.051 | 0.007* | 0.028 | × |
| 5 | | 0.088 | × | 0.223* | 0.024 |
| 8 | | 0.158 | 0.086 | 0.013* | 0.152 |
| 10 | | 0.055 | × | 0.226* | 0.015 |
| 12 | | 0.054 | 0.010* | 0.021 | × |
| 16 | | 0.017 | 0.011 | 0.050 | 0.017 |
| 18 | | 0.212 | 0.110 | 0.014 | × |
| 22 | | 0.016 | 0.009 | 0.043 | × |
| 28 | | 0.168 | 0.154 | 0.011 | × |

델팅하여도 작은 값의 값을 나타낸다. 따라서 3번과 12번 시료외에는 모두 재결정화가 비교적 잘 이루어졌음을 알 수 있다. 마지막으로 그림 3~5에 나타난 모든 시료들의 측정된 ψ 스펙트럼들을 보면, 3.4 eV 근처의 봉우리(peak)가 모델링한 값보다 작고 적색이동(red-shift)한 것을 알 수 있는데, 이는 첨가물(dopant)이 활성화되면서 자유 운반자 농도가 높아진 것에 대한 광학적 응답이라 생각된다[22].

5. 결 론

실리콘에 각각 As^+ , P^+ , BF_2^+ 이온들을 40 keV의 이온주입에너지로 $\sim 10^{15}$ ions/cm² 정도 주입한 뒤 온도, 시간, 분위기 가스 등을 변화시켜가며 열처리한 시료들을 분광 타원해석법을 이용하여 분석하여 열처리 조건에 따른 재결정화를 조사하였다. 조사된 대부분의 열처리 조건하에서 고체상 적층성장(solid-phase epitaxial growth) 과정에 따라 재결정화가 되는 것을 알 수 있었으며, 또한 분석 결과로부터 열처리 후에도 잔류하는 결함들의 양과 분포를 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 1995년도 아주대학교 교내연구비 지원을 받아 이루어졌음을 밝히며 감사드립니다.

참고문헌

1. S. M. Sze, *VLSI Technology*, Chap. 6 (McGraw-Hill Book Company, 1983).
2. J. Linhard, M. Scharff and H. Schiott, *Mat.-Fys. Med. Dan. Vid. Selsk* **33**, 1 (1963).
3. J. F. Gibbons, *Proceedings of the IEEE* **60**, 1062 (1972).
4. J. K. N. Linder, R. Zuschlag and E. H. te Kaat, *Mat. Sci. Eng.* **B12**, 7 (1992).
5. T. M. Burns, S. Chongsawangvirod, J. W. Andrews, E. A. Irene, G. McGuire and S. Chevacharoekul, *J. Vac. Sci. Technol.* **B9**, 41 (1991).
6. R. A. B. Devine, *J. Non-Cryst. Sol.* **152**, 50 (1993).
7. M. Erman, J. B. Theeten, M. Chambon, S. M. Kelso and D. E. Aspnes, *J. Appl. Phys.* **56**, 2664 (1984).
8. K. Vedam, P. J. McMarr and J. Narayan, *Appl. Phys. Lett.* **47**, 339 (1985).
9. P. J. McMarr, K. Vedam and J. Narayan, *J. Appl. Phys.* **59**, 694 (1986).
10. J. B. Theeten and M. Erman, *J. Vac. Sci. Technol.* **20**, 471 (1982).
11. T. Motooka, F. Kobayashi, Y. Hiroyama and T. Tokuyama, *Jpn. J. Appl. Phys.* **32**, 318 (1993).
12. G. E. Jellison, Jr. and F. A. Modine, *Phys. Rev.* **B27**, 7466 (1983).
13. J. Petruzzello, T. F. McGee, M. H. Frommer, V. Rumennik, P. A. Walters and C. J. Chou, *J. Appl. Phys.* **58**, 4605 (1985).
14. N. N. Gerasimenko, A. P. Mazhirin, E. N. Nagadev and I. V. Verner, *Nucl. Instr. and Meth.* **B51**, 25 (1990).
15. D. E. Aspnes, A. A. Studna and E. Kinsbron, *Phys. Rev.* **B29**(2), 768 (1984).
16. M. Fried, T. Lohner, W. A. M. Aarnink, L. J. Hanekamp and A. van Silfhout, *J. Appl. Phys.* **71**, 2835 (1992).
17. M. Fried, T. Lohner, W. A. M. Aarnink, L. J. Hanekamp and A. van Silfhout, *J. Appl. Phys.* **71**, 5260 (1992).
18. O. S. Heavens, *Optical properties of Thin Films* (Dover, New York, 1955), Chap. 4.
19. R. Muller, *Surf. Sci.* **16**, 14 (1969).
20. J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 2nd ed. (John Wiley & Sons Inc., New York, 1975), Chap. 7.
21. R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light* (North-Holland, New York, 1977), Chap. 4.
22. D. E. Aspnes, *J. Opt. Soc. Am.* **64**, 812 (1974).
23. S. Y. Kim and J. H. Shin, *Proc. of 7th Optics and Quantum Electronics Workshop*, 45 (1990).
24. S. Y. Kim, *J. Korean Opt. Soc.* **1**, 73 (1990).
25. D. E. Aspnes, *SPIE* **276**, 188 (1986).
26. S. Y. Kim and K. Vedam, *Appl. Opt.* **25**, 2013 (1986).
27. H. J. Ahn, C. H. Lee, S. Lee, S. Oh, S. Y. Kim, *New Physis* **34**, 257 (1946).