

BF₂⁺ 이온 注入된 실리콘 試料의 格子損傷과
不純物 濃度分布에 대한 研究

(A Study on the Lattice Damages and Impurity
Depth Profiles of BF₂⁺ Ion Implanted Silicon)

權相直*, 白文哲*, 車柱演*, 權五準*

(Sang Jik Kwon, Mun Cheol Paek, Ju Youn Cha and Oh Joon Kwon)

要 約

BF₂⁺ 를 이온주입한 실리콘 시료에 있어서 격자의 손상과 그에 따른 불순물분포의 영향을 연구하였다. 열처리 온도 및 이온 도우즈에 따른 역 열처리 현상의 발생과 불순물의 분포, 결정결함의 형성 등을 알아보기 위해 전기적 측정방법 및 SIMS, TEM 분석 기술을 이용하였다. 1×10¹⁵/cm²의 도우즈에서는 전형적인 역 열처리 현상이 나타났으며 5×10¹⁵/cm²의 도우즈에서는 역 열처리 현상이 나타나지 않았는데 이것은 높은 도우즈의 BF₂⁺ 를 이온 주입시 발생하는 비정질 영역의 형성으로 설명되어졌다. 즉 비정질 영역은 열처리시에 에피택시 반응에 의하여 재결정화하므로 결정결함이 적은 양질의 열처리 효과를 얻을 수 있다. SIMS 분석기술로서 불순물들이 일정영역에 응집해 있는 현상을 확인하였다. 그리고 TEM 단면관찰법으로 전위환 등의 결정결함을 관측하였는데 이 전위환들은 열처리 동안 결정손상영역에서 형성되었다.

Abstract

A study on the lattice damages and impurity depth profiles have been performed with BF₂⁺ ion implanted silicon materials. Electrical measurement, SIMS and TEM analysis techniques were used in order to identify the reverse annealing phenomena, impurity depth profiles and lattice damages. A typical reverse annealing phenomena were shown at the dose of 1x10¹⁵/cm², and non-reverse annealing at the dose of 5x10¹⁵/cm². This was explained with the formation of the amorphous region at BF₂⁺ ion implantation with high dose. That is, the amorphous regions were recrystallized by solid phase epitaxial process, resulting the reduction of the lattice damages. Impurities concentrated at certain regions were measured by SIMS technique. The dislocation loops-like crystalline defects were observed with TEM cross sections, which were formed at the lattice damaged region during annealing process.

*正會員, 韓國電子通信研究所 半導體技術支援센터
技術分析室
(Electronics and Telecommunication Research
Institute, Technical Analysis Sec.)
接受日字: 1987年 11月 18日

I. 서 론

반도체 소자의 초 고집적화에 따라 평면적인 길이의 축소와 함께 깊이방향으로도 축소된 소자구조를 요구하고 있다. 이에 따라 고 농도의 얇은 pn접합을 형성시키기 위해서는 종래의 방법으로는 한계가 있

으므로 이온주입법을 이용한다. 이온주입법은 원하는 불순물을 이온 상태로 만들어서 실리콘 등의 타겟에 적당한 에너지와 주입량(dose)으로 강제 주입시키는 방법으로서, 1960년도 부터 연구가 진행되어 1975년에 이르러 VLSI 소자의 제조에 적용되기 시작하였다. 이 방법은 불순물의 농도와 깊이분포를 정밀하게 조절할 수 있고 확산방법에 비해 저온에서 행할 수 있는 장점이 있어 최근들어 필수적인 공정 기술로 각광받고 있다. 그런데 n형의 얇은 접합은 As⁺ 이온을 주입하여 쉽게 얻어질 수 있으나 p형의 얇은 접합은 p형 불순물인 B⁺ 이온주입을 사용하는데 한계가 있다. 즉 B의 질량은 실리콘에 비하여 매우 작기 때문에 낮은 주입에너지에서도 깊은 영역까지 침투되기 때문이다. 이와 같은 문제를 극복하기 위해서 B대신에 질량이 큰 BCl₃, BF₃, BBr₃ 등의 할로겐 화합물을 이용한 연구가 진행되었으며 최근에는 특히 BF₂⁺ 이온을 사용한 이온주입법이 주로 사용되고 있다.¹¹⁻¹³

BF₂⁺ 이온은 실리콘 내에 주입되어 산란되면서 ¹¹B 및 ¹⁰F 원자들로 분해되는데, ¹¹BF₂⁺ 이온의 주입에너지가 E₀ 인 경우 ¹¹B 원자의 분포 깊이는 ¹¹B⁺ 이온이 (11/49)E₀ 의 에너지로 주입된 경우와 같은 분포를 갖는다. 이와 같이 고 농도의 얇은 접합을 형성할 수 있는 점 이외에도 BF₂⁺ 이온주입법의 장점으로서는 열처리 효과(annealing)에서 유리한 점을 들 수 있다.¹⁴ BF₂⁺ 이온은 비교적 무거운 질량을 가지고 있기 때문에 높은 도우즈(dose)로 이온주입 시에 실리콘 원자에의 에너지 전달이 커서 비정질 영역(amorphous region)을 형성한다. 이 비정질 영역은 열처리 과정에서 고상 에피택시(solid phase epitaxy)에 의해 재결정화(recrystallization)되며 결정결함의 형성이 최소화된다. 그런데 높은 도우즈의 BF₂를 이온주입하면 표면으로 부터 어떤 깊이까지 이와같은 비정질 영역이 형성되는 것과 함께, 어떤 깊이 이상에서는 격자성을 유지한 채 손상을 받는 격자손상 영역(lattice damaged region)이 형성된다. 이 영역은 열처리 시 전위환(dislocation loop)이나 적층결함(stacking fault)과 같은 결정결함이 쉽게 발생하며 결과적으로 이에 따른 불순물들의 응집 효과를 일으키는 등의 영향을 미친다.

본 연구는 얇은 접합 깊이를 얻기 위하여 BF₂⁺ 이온을 주입시킨 시편에 대하여 도우즈 및 열처리 조건에 따른 현상을 측정하여 실리콘 격자의 손상과 불순물의 분포 등에 대하여 연구하고자 하였다. 전기적으로 활성을 가지는 B 이온의 농도분포를 양극 산화법으로서 측정하였고 SIMS(secondary ion mass

spectrometry : 2차이온 질량분석기) 측정법으로서 표면으로 부터의 깊이방향에 대한 B 및 F의 실제 농도분포를 측정하였다. 또한 TEM(transmission electron microscopy : 투과전자현미경) 단면관찰 분석법으로서 결정결함의 상태를 관찰하여 이온주입에 따른 격자손상과 열처리 효과 등을 분석하고자 하였다.

II. BF₂⁺ 이온注入 및 熱處理(annealing)

1. 이온 주입의 원리 및 농도 분포

B⁺ 또는 BF₂⁺ 이온을 주입시키기 위해서는 원천가스로서 BF₃를 사용한다. BF₃ 가스 분자들은 이온주입기의 가스실내로 들어가면 가열된 필라멘트로부터 방출되는 열전자와 충돌하여 이온화된다. 이때 BF₃ 가스 분자들의 이온화 확률을 크게 하기 위하여 열전자는 100V의 전위차에 의해 가속되고 동시에 충돌확률을 증가시키기 위해 자기장을 가함으로써 방출된 열전자의 나선운동(spiral path)을 유발시킨다. 이와같이 하여 BF₃ 분자는 B⁺, F⁺, BF⁺ 및 BF₂⁺ 등의 이온들로 분해된다. 생성된 이온들은 이온화실 앞에 놓여진 전극에 의해 초기 가속화되어 나가고 그 앞에 놓여진 질량분석기에 의해 원하는 이온만이 선별된다. 즉, 자기장을 적절히 조절함으로써 각 이온의 '질량 대 전하비' 차이에 의하여 B⁺ 혹은 BF₂⁺ 이온을 선택할 수 있다. 그림 1은 BF₃ 분자의 이온들을 질량분석한 스펙트럼을 나타낸다. 선별된 이온은 가속관을 지나는 동안 최종의 원하는 에너지를 얻어 이온주입실에 놓여진 시료에 주입된다. 이때 주입된 이온의 침투깊이는 이온 에너지에 따라 결정되며 특정 결정방향으로 깊이 침투되는 채널링 효과를 방지하기 위해 타겟트는 보통 이온 주입 방향에 대해 7°

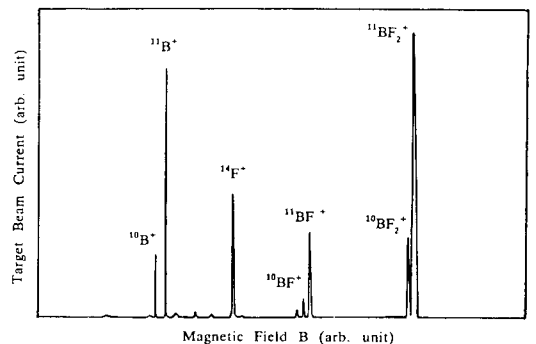


그림 1. BF₃ 분자의 이온들을 질량분석한 스펙트럼
Fig. 1. Mass spectrum of BF₃ molecule (DF-4/5 Varian implanter manual).

정도 경사지게 한다.

타겟내에서 에너지에 따른 이온의 range, R 은

$$R(\text{\AA}) = \frac{130E}{\rho} \left[\frac{1+M_2/M_1}{Z_1^{2/3}} \right] \quad (1)$$

으로 표현된다.^[5] 여기서 ρ 는 기관의 밀도(gm/cm³) 이고 M₁, M₂ 는 주입되는 이온과 타겟 원자의 원자량이며 Z₁ 은 주입되는 이온의 원자번호를 나타내고 E는 이온주입 에너지 (KeV)를 나타낸다. 타겟 표면으로부터의 수직 침투깊이(projection range) R_p 는 R 에 직접 비례한다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 R 은 에너지에 따라 증가하며 주입되는 이온의 원자량이 클 수록 감소함을 알 수 있다. 주입된 이온은 깊이 에 따라 통계적 분포를 갖게 되는데 일반적으로 가우시안 분포를 이룬다. 즉 깊이 에 따른 농도 n(x) 는

$$n(x) = \frac{0.4D}{\Delta R_p} \exp \left[-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2} \right] \quad (2)$$

로 표현된다. 여기서 D는 도우즈(단위 cm² 당 주입된 이온수) 이고 ΔR_p 는 분포의 표준편차 이다. BF₂⁺ 이온을 E₀ 의 에너지로 이온주입하는 경우 B 원자가 갖는 유효에너지는 B 및 F가 갖는 질량비에 의해 결정된다.^[6] 즉 B 원자의 유효에너지 E_B 는,

$$E_B = E_0 \left[\frac{m_B}{m_B + 2m_F} \right] = (11/49) E_0 \quad (3)$$

이므로 *BF₂⁺ 이온을 E₀ 의 에너지로 이온주입할 경우 B 원자의 분포는 ¹¹B⁺ 이온을 (11/49) E₀ 의 에너지로 주입한 경우와 같게 된다.

2. 실리콘 결정격자의 변위 및 결함

Lindhard, Scharff 및 Shiott(LSS) 이론^[7] 에 의하면 이온들이 실리콘 격자 속으로 들어가면서 단위 거리 이동함에 따라 손실되는 전 에너지는

$$\left| \frac{dE}{dx} \right|_{\text{total}} = \left| \frac{dE}{dx} \right|_{\text{nuclear}} + \left| \frac{dE}{dx} \right|_{\text{electronic}} \quad (4)$$

로 표현된다. 이 식은 다시

$$N \cdot S(E) = N[S_n(E) + S_e(E)] \quad (5)$$

로 표현되는데 여기서 N 은 실리콘 원자의 밀도이고 S(E) 는 정지력(stopping power) 으로서 주입된 이온이 단위거리 움직일때 한 개의 실리콘 원자에 의해 손실된 에너지를 의미하며 S_n(E) 와 S_e(E) 는 각각 핵 정지력 및 전자 정지력을 나타낸다. 이온들이 실리콘 격자내에 들어가면서 이와 같은 정지력을 받게 되는데 이 중에서 핵 정지력 만이 실리콘 원자들의 변위를 유발시킨다. ¹¹B 와 같은 가벼운 원소들이

실리콘 표면으로 들어가면 초기에는 대부분 전자 정지력을 받게 되고 이들이 점차 에너지를 소모함에 따라 핵 정지력이 우세하게 되면서 이 동안 실리콘 원자들의 변위가 발생한다. 반면에 ³¹P, ⁷⁵As 및 *BF₂⁺ 와 같은 무거운 이온들이 실리콘 표면으로 들어가면 처음부터 상당한 정도의 핵 정지력을 받게 되므로 표면 가까이에서도 상당수의 실리콘 원자들이 변위를 일으킨다. 이온들이 에너지를 소모하면서 속도가 감소하게 되면 핵 정지력은 대부분의 에너지 범위에 걸쳐 일정하게 된다. 따라서 변위로 인한 실리콘 격자의 손상 분포는 주입된 이온의 분포와 비슷한 형태로 존재한다. 이 때에 실리콘 원자들이 변위로 인하여 발생하는 점격자결함(point defect)에는 격자간 원자(interstitials), 공공(vacancy), 이중 공공(double vacancy), 다중 공공(multi-vacancy) 및 공공과 불순물의 복합형태(vacancy-impurity complex) 등이 있다. 무거운 이온의 경우일수록 단위체적당 변위정도는 실리콘 밀도(5×10²² atoms/cm³)에 접근하며 이온주입량에 따라 거의 선형적으로 비례한다. 변위를 받은 실리콘 원자수가 5×10²²/cm³에 이르면 결정구조가 손실되고 거의 비정질(amorphous) 상태가 된다. *BF₂⁺ 이온을 5×10¹⁵/cm² 이상의 도우즈로 이온 주입하게 되면 표면으로부터 R_p 위치까지는 거의 비정질 상태가 되며 그보다 깊은 쪽에서는 격자손상 영역으로 존재하게 된다.

3. 열처리 온도의 영향

이온 주입 직후의 B 원자는 대부분 격자간 위치(interstitial site)에 존재하므로 전기적 전도성을 갖지 못하고 비활성화 상태에 있게된다. 따라서 전기적 전도성을 갖는 활성화 상태의 B 원자로 만들기 위해서는 실리콘 격자상의 치환위치(substitutional site)로 존재하도록 해야하며 이를 위해 적당한 온도 이상에서 수십 분 동안 열처리하는 것이 필요하다. 일반적으로 1×10¹³/cm² 이하의 낮은 도우즈로 이온주입한 경우에는 열처리 온도가 증가함에 따라 전기적 전도성이 증가한다. 이것은 낮은 도우즈에서 격자손상의 정도가 적기 때문에 B 원자가 격자간 위치로부터 치환위치로 전환하는 비율이 증가하기 때문이다. 도우즈가 1×10¹⁴/cm² 이상이 되면 고 농도의 이온주입으로 인한 격자의 손상이 발생하여 격자간 원자, 공공, 이중 공공 등의 점결함 농도가 증가하게 되므로 열처리 과정에서 다른 현상이 나타난다. 500℃ 부근까지는 온도를 증가함에 따라 치환 위치에 존재하는 B 원자의 수는 감소하지만 이중 공공의 소멸로 인하여 자유전하(free carrier)의 농도가 크게 증가

하므로 결과적으로 전기적 전도도가 증가하게 된다. 그러나 500°C 이상에서 부터는 전위(dislocation)가 형성되기 시작하면서 전위 근처에서 B 원자의 응결(precipitation)이 발생하고 치환위치에 있는 B 원자의 농도가 감소한다. 따라서 이 온도 영역에서는 열처리 온도의 증가에 따라 전기적으로 활성화된 B 원자의 농도가 감소하여 전기전도도가 감소하는데 이 현상을 역 열처리(reverse annealing)라고 부른다. 이런 현상은 어느 일정한 온도까지 계속되다가, 다시 치환 위치의 B 원자 농도가 증가하기 시작하는데 이는 어느 온도 이상에 이르면 실리콘 자체의 공공(self vacancy)이 생성되고 이 공공이 B 원자들의 응결된 곳까지 이동하여 응결된 B 원자들을 분리시키기 때문인 것으로 알려져 있다.¹⁶⁾ 따라서 그 이상의 온도에서 부터는 온도가 증가함에 따라 활성 B 원자의 농도는 계속 증가한다.

그런데 $10^{15}/\text{cm}^2$ 범위 이상의 높은 도우즈로 이온을 주입하게 되면 표면으로부터 B의 피크 위치까지는 변위된 실리콘 원자수가 $5 \times 10^{22}/\text{cm}^2$ 까지 이르러 비정질 상태가 된다. 이 영역은 열처리시 다른 과정을 거치게 된다. 즉 표면으로부터 피크 위치까지의 비정질 영역에서는 고상 에피택시(solid phase epitaxy) 반응으로 결정질 부위로부터 재결정화(recrystallization)되면서 이루어진다. 따라서 500°C 내지 700°C의 낮은 열처리 온도에서도 낮은 도우즈로 이온주입한 경우 발생하는 격자손상 영역에 비하여 결정결합이 적은 양질의 열처리 효과를 얻을 수 있다.

III. 熱處理 溫度에 따른 B 原子的 分布와 電氣의 特性

1. 열처리 온도와 전기적 특성

BF_2^+ 이온의 도우즈와 열처리 온도의 영향을 알아보기 위해 다음의 실험을 하였다. 3~5 Ω-cm의 비저항을 가지고, (100)의 방향성을 가지는 n-type의 silicon 웨이퍼에 500 Å의 산화막을 1000°C에서 TCE 산화법으로 형성하였다. 그 다음 BF_2^+ 이온을 100 KeV의 에너지로 각각 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 및 $5 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 의 도우즈를 주입하였다. 이렇게 하여 이온주입된 실리콘 웨이퍼를 N_2 분위기하에, 500°C에서 1000°C의 범위에 걸쳐 100°C 간격으로 30분의 일정시간 동안 열처리 하였다. 열처리 후 산화막을 제거하고 4점 측정기(4 point probe)를 이용하여 표면에서의 면저항(sheet resistance), R_s 값을 측정하여 그 결과를 그림 2에 나타내었다.

그림 2로부터, 도우즈가 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 인 경우에는

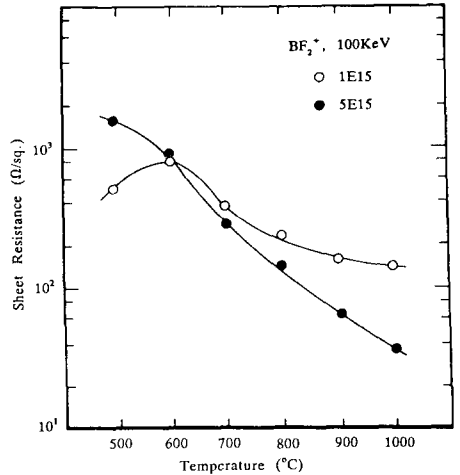


그림 2. BF_2^+ 의 도우즈에 따른 열처리 온도 대 면저항 R_s

Fig. 2. Variations of sheet resistance R_s vs. annealing temperatures with BF_2^+ doses.

500°C부터 600°C 근처에서 역 열처리 현상이 나타나는 것을 볼 수 있으며 이것은 이온주입 시 격자손상 영역이 형성되어 있는 것을 의미하고 있다. 그런데 도우즈가 $5 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 인 경우에는 역 열처리 현상이 발생하지 않고 온도 증가에 따라 전기전도도가 계속 증가하는 현상이 나타난다. 이 결과는 전술한 바와 같이 $5 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 의 도우즈에서 비정질 영역이 형성된 후 온도 증가에 따라서 재결정화되는 정도가 증가하기 때문인 것으로 추측된다. 이 사실로부터 BF_2^+ 이온주입에 의하여 비정질 영역이 생성되는 이온 도우즈는 $10^{15}/\text{cm}^2$ 범위에 해당하는 것을 알 수 있다.

2. 活性化된 B 이온의 깊이分布

활성화된 B 이온의 깊이분포를 구하기 위해서 양극 산화법(anodization)을 사용하였는데, 이 방법의 절차는 다음과 같았다. 200ml의 $\text{CH}_3\text{OHCH}_2\text{OH}$ 용액에 800g의 KNO_3 를 녹이고 10ml의 순수(DI water)를 혼합한 전해액을 비아커에 담아 음극에는 백금을 연결하고 양극에는 실리콘 시편을 연결하였다. 두 전극 간에 200 내지 240V의 직류전압을 가하였으며 한번에 성장되는 산화막의 두께는 1000 Å 이하가 되도록 조절하였다. 성장된 산화막을 10 : 1 HF 용액에서 식각시키고 면저항 값을 측정하였으며 이와 같은 과정을 계속 반복하여 깊이에 따른 R_s 값을 측정하였다. R_s 값의 분포로부터 비저항 $\rho(x)$ 를 구하기 위해 다음 식을 사용하였으며 이를 다시 농도로 환산하기 위하여 Irvin's curve를 이용하였다.

$$\rho = \frac{0.4343 R_s}{d(\log R_s)/dx} \quad (7)$$

그림 3은 이와 같이하여 측정된 결과로서 BF₂⁺ 가 1×10¹⁵/cm² 이온 주입된 경우의 활성화된 B 이온 농도분포인데 열처리 온도가 600℃ 일때가 500℃ 일때보다 전기전도도가 감소하는 역 열처리 현상이 나타나며 700℃ 이하의 낮은 온도 범위에서는 깊이방향으로 거의 전 영역에 걸쳐서 활성화된 B 원자의 농도가 낮은 것을 볼 수 있다. 900℃에 이르러 비로소 대부분의 B 원자가 치환위치에 존재하면서 전기적인 활성을 보이는 완전한 열처리가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

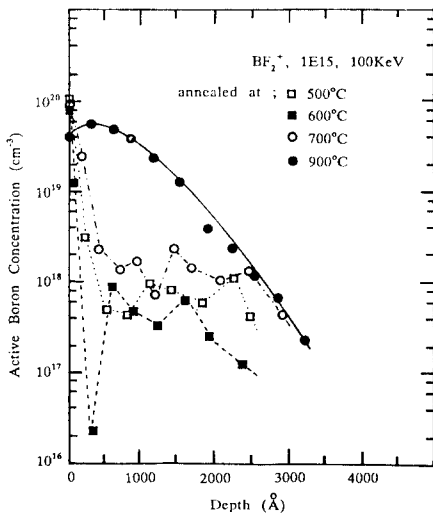


그림 3. 열처리 온도에 따른 활성화 B 원자의 농도 깊이분포; BF₂⁺, 1 × 10¹⁵/cm², 100KeV.
Fig. 3. Concentration depth profile of active B atoms with annealing temperatures; BF₂⁺, 1 × 10¹⁵/cm², 100KeV.

그림 4는 BF₂⁺ 가 5×10¹⁵/cm²로 이온 주입된 경우인데 열처리 온도가 증가함에 따라 활성화된 B 원자의 농도가 점차 증가하는 현상을 보여주며 실리콘 표면으로부터 피크 위치가 존재하는 300 Å 정도까지는 700℃의 낮은 온도 범위에서도 상당량의 B 원자가 활성화된 것을 볼 수 있다. 그리고 피크보다 깊은 영역에서의 활성화된 B 원자 농도는 아주 낮게 존재한다. 이러한 현상은, 실리콘 표면으로부터 피크 위치까지 비정질 영역이 형성됨으로 인하여 열처리시 에피택시 성장과 같은 현상으로 재결정화 되기 때문에 낮은 온도 범위에서도 빨리 활성화되며 그

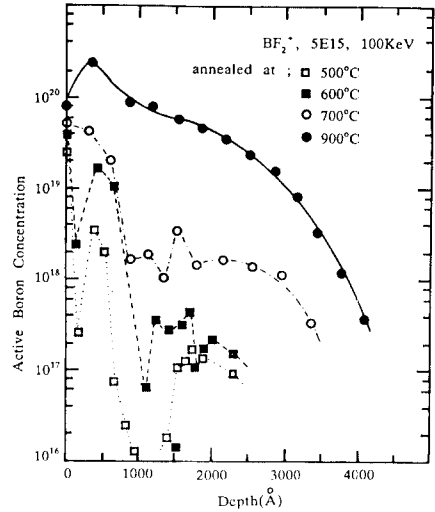


그림 4. 열처리 온도에 따른 활성화 B 원자의 농도 깊이분포; BF₂⁺, 5 × 10¹⁵/cm², 100KeV
Fig. 4. Concentration depth profile of active B ions with annealing temperatures; BF₂⁺, 5 × 10¹⁵/cm², 100KeV.

이하의 깊은 영역에서는 격자손상 영역으로 700℃ 이하의 온도에서는 거의 열처리가 이루어지지 않은 것으로 생각된다.¹²⁾ 또한 열처리 온도가 900℃인 경우, 비정질 영역에서의 활성화된 B 원자 농도의 피크가 나타나는 것을 볼 수 있다.

IV. SIMS (2차 이온 質量分析機)에 의한 B, F의 濃度分布 測定

SIMS (secondary ion mass spectrometry)는 극미량의 불순물 함량에 대한 ppm 수준의 정밀측정이 가능하며 깊이방향의 분포를 얻을 수 있는 장비이다. 본 실험에 사용된 SIMS는 CAMECA사의 IMS-3F이었다. 1차 이온으로 O₂⁺를 12.6KeV의 에너지, 2.94μA의 빔 전류로 시편 상에 주사(rastering)시켰으며 주사 면적은 500×500μm²이고 분석 면적은 85μm의 직경이었다. B와 F의 깊이 분포를 구하기 위해 B⁺ 및 F⁺의 2차 이온을 선택하였으며 농도에 대한 분포로 환산하기 위해 BF₂⁺가 이온주입된 실리콘의 표준시편을 사용하였다. 사용된 시편은 50KeV의 에너지와 5×10¹⁵/cm²의 도우즈로 BF₂⁺를 주입시킨 것으로서 열처리 전후에 대한 것을 비교하였다.

그림 5는 열처리를 행하지 않은 것으로서 그림에서와 같이 F 농도는 B 농도의 2배 가량되며 피크 위치는 300 Å 근처이다. 이 경우 B가 갖는 유효 주입

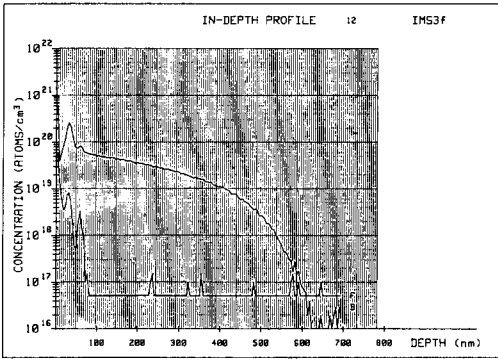


그림 5. BF_2^+ , 50KeV, $5 \times 10^{15}/cm^2$ 이온주입된 실리콘 시편에서의 B와 F의 SIMS 분포 측정결과

Fig. 5. SIMS depth profiles of B and F in BF_2^+ , 50KeV, $5 \times 10^{15}/cm^2$ ion implanted silicon.

에너지는 B 및 F의 질량비인 12KeV 정도로 계산되는데, 실제 B^+ 를 12KeV의 에너지로 $5 \times 10^{15}/cm^2$ 이온 주입한 경우 이론적으로 계산한 가우시안 분포곡선 결과를 그림 6에 나타내었으며 그림 5의 B 원자 분포곡선과 거의 유사함을 볼 수 있다.

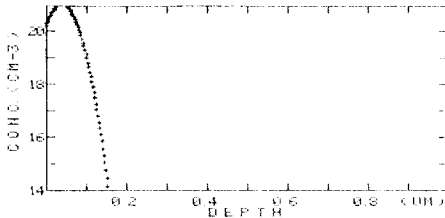


그림 6. B^+ , 12KeV, $5 \times 10^{15}/cm^2$ 이온주입된 실리콘 시편에서의 B에 대한 이론적 가우시안 분포 계산결과

Fig. 6. Calculated gaussian depth profile of B in B^+ , 12KeV, $5 \times 10^{15}/cm^2$ ion implanted silicon.

그림 7은 BF_2^+ 를 이온주입 한 후 950°C에서 40분간 열처리한 실리콘 시편에 대한 SIMS 분포 측정결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 각 불순물의 분포가 매우 달라져 있는 것을 알 수 있는데 여기서 주목할 것은 B와 F의 피크가 형성되는 위치이다.

먼저 약 300 Å 정도의 깊이에 각각 하나의 피크를 형성하고 있는 것을 볼 수 있는데 이것은 그림 4에서 활성화 B 원자의 피크가 형성된 것과 유사한데

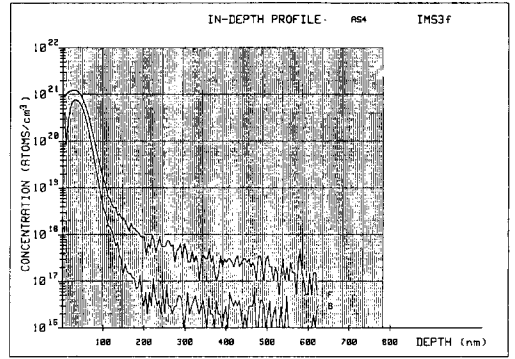


그림 7. 250 Å SiO_2 를 통해 Si속으로 BF_2^+ , 50KeV, $5 \times 10^{15}/cm^2$ 를 이온주입 한 후 950°C, N_2 에서 40분 열처리 한 시편에 대한 B 및 F의 SIMS 분포 측정

Fig. 7. SIMS depth profiles of B and F in silicon, implanted through 250 Å SiO_2 with BF_2^+ , 50KeV, $5 \times 10^{15}/cm^2$ and annealed at 950°C, N_2 , 40min.

그 위치는 해당 이온주입 에너지 및 도우즈에 의한 B 원자의 R_p 에 일치한다. 이러한 피크의 발생은 BF_2^+ 를 $5 \times 10^{15}/cm^2$ 의 높은 도우즈로 이온주입할 경우 변위된 실리콘 원자수가 $5 \times 10^{22}/cm^3$ 이상 발생하여 비정질 상태로 되었음을 의미한다. 즉 비정질 영역에서의 B 및 F 원자들의 확산계수는 결정질 부위보다 작기 때문에 열처리 과정에서 상대적으로 불순물의 확산이 이루어지지 않아서 피크를 형성하는 것으로 생각된다. 반면에 600 Å 깊이에 형성된 제 2피크는 R_p 의 2배에 이르는 영역으로 격자손상 영역에 해당된다. 이곳은 결정결함의 형성에 의한 불순물 원자의 응결과 분해가 이루어지는 곳으로, 상대적으로 확산계수가 큰 F 원자가 B 원자에 비하여 큰 응결 정도를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 표면에서의 B 및 F 농도의 급작스런 증가는 SIMS에 의한 이온 에칭시 표면에서의 화학적 효과(chemical effect) 때문이다.

V. TEM (透過電子顯微鏡)에 의한 結晶缺陷 觀測

위에서, 열처리된 시편에 대해 TEM (transmission electron microscopy)으로 관찰한 결과를 그림 8 (a) 및 그림 8 (b)에 나타내었다. 열처리가 이루어지지 않은 시편에서는 상의 대조(image contrast)가 이루어지지 않아 TEM 확대상의 형성이 어려워져 관찰이 되지 않았다.

그림 8(a)는 9만 배로 확대 관찰한 것인데 표면으로부터 약 600 Å 영역에서 전위환(dislocation loop)과 같은 결정결함들이 다수 존재하고 있는 것을 볼 수 있는데 이 위치는 위에서 언급한 2R_p에 해당하는 곳으로 SIMS 분포곡선에서 제 2피크를 형성한 곳과 일치한다. 즉, 격자손상 영역에서 결정결함이 발생한 것을 보여주고 있으며 SIMS 분포의 결과를 뒷받

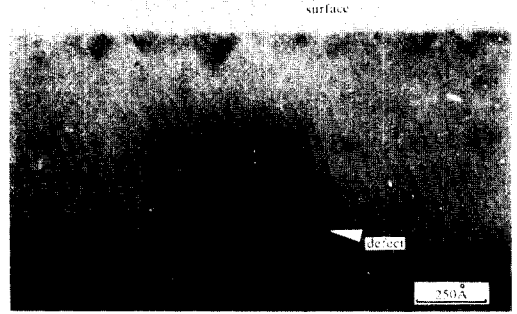


그림 8. (c) 250 Å SiO₂를 통해 Si 속으로 BF₂⁺, 50KeV, 5 × 10¹⁵/cm²를 이온주입 한 후 950°C, N₂에서 40분 열처리 한 시편에 대한 TEM 관찰(×810,000)

Fig. 8. (c) TEM observation of the silicon specimen implanted through 250 Å SiO₂ with BF₂⁺, 50KeV, 5 × 10¹⁵/cm² and annealed at 950°C, N₂, 40min(×810,000).

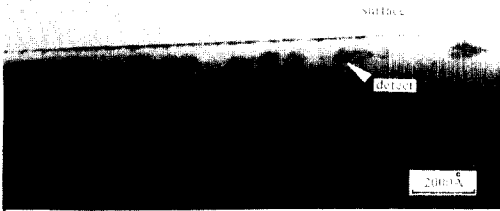


그림 8. (a) 250 Å SiO₂를 통해 Si 속으로 BF₂⁺, 50KeV, 5 × 10¹⁵/cm²를 이온주입 한 후 950°C, N₂에서 40분 열처리 한 시편에 대한 TEM 관찰(×90,000)

Fig. 8. (a) TEM observation of the silicon specimen implanted through 250 Å SiO₂ with BF₂⁺, 50KeV, 5 × 10¹⁵/cm² and annealed at 950°C, N₂, 40min(×90,000).



그림 8. (b) 250 Å SiO₂를 통해 Si 속으로 BF₂⁺, 50KeV, 5 × 10¹⁵/cm²를 이온주입 한 후 950°C, N₂에서 40분 열처리 한 시편에 대한 TEM 관찰(×300,000)

Fig. 8. (b) TEM observation of the silicon specimen implanted through 250 Å SiO₂ with BF₂⁺, 50KeV, 5 × 10¹⁵/cm² and annealed at 950°C, N₂, 40min(×300,000).

침하고 있다. 이 영역과 표면사이에 300 Å 정도 깊이에서 미세한 띠구조(band structure)를 나타내고 있는 것은, 고 농도의 불순물들의 침적(precipitation)과 관련이 있는 것으로 생각된다.

그림 8(b)는 결정결함을 30만 배로 확대하여 관찰한 것으로 전위환의 모습이 명확하게 나타나 있음을 알 수 있다. 이 전위환의 크기는 약 300 Å의 직경으로 비교적 안정화된 상태의 것으로 보여진다. 그림 8(c)는 하나의 전위환을 다시 81만 배로 확대한 것으로 환의 모서리에 해당하는 부분에서 불순물의 응결물질로 보이는 결함씨(defect seed)를 관찰할 수 있다.

VI. 결 론

P⁺의 얇은 접합 깊이를 얻기 위하여 사용된 BF₂⁺ 이온주입 공정에 대하여, 이온 도우즈 및 열처리 과정에 따른 결정격자 손상 및 불순물 분포상태를 연구하였다. 일정시간의 열처리 시 50KeV의 주입에너지에서는 이온 도우즈가 1 × 10¹⁵/cm²인 경우 격자손상에 의한 전형적인 불순물 재분포상태로서 온도에 따라 역 열처리 현상이 나타났으며, 5 × 10¹⁵/cm²에서는 역열처리 현상이 발생하지 않았다. 이것은 비정질 영역이 형성되어 고상 에피택시 반응으로 인한 열처리 효과가 일어난 것을 의미한다. 또한 5 × 10¹⁵/cm²의 도우즈로 이온주입한 시편에 대하여 SIMS로서 불순물의 분포상태를 측정된 결과, 비정질 영역과 격자

손상 영역의 경계에 해당하는 부분에 불순물이 응집해 있었고 비정질 영역내에서도 높은 불순물 농도를 나타내었다. 이것은 비정질 영역에서의 불순물의 확산계수가 낮은 것이 그 이유인 것으로 생각되었다. 이와 같은 결과는 TEM 을 이용한 단면관찰로서 비교 분석하였으며 전위환 등의 결정결함 상태를 관찰할 수 있었다.

參 考 文 獻

- [1] M.Y. Tsai and B.G. Streetman, "Anomalous migration of fluorine and Electrical Activation of Boron in BF_2 implanted silicon," *Appl. Phys. Lett.* 32. p.144 (1978)
- [2] M.Y. Tsai and B.G. Streetman, "Recrystallization of Implanted Amorphous silicon layers I. Electrical properties of silicon implanted with BF_2^+ or $\text{Si}^+ + \text{B}^+$," *J. Appl. Phys.* 50. p. 183 (1979)
- [3] G. Fuse et. al., "Electrical Properties of Silicon heavily implanted with boron molecular Ions," *J. Appl. Phys.* 53. p.3650 (1982)
- [4] 권상직, 권오준, 정호선, "B⁺ 및 BF₂⁺ 가 이온주입된 실리콘 웨이퍼의 annealing 효과," 대한전자공학회 하계 학술대회, p. 24, 1985.
- [5] J.F. Gibbons, W.S. Johnson and S.W. Mylroies, "Projected Range in Semiconductor," *Academy press.* vol. 2, New York (1975)
- [6] M.Y. Tsai, D.S. Day and B.G. Streetman, "Recrystallization Implanted amorphous silicon Layers," *J. Appl. Phys.* 50. p. 188 (1979)
- [7] J. Lindhard, M. Scharff and H. Schiott, "Range Concepts and Heavy Ion Ranges," *Mat-Fys Med. Dan. vid Selsk*, 33. p.1 (1963)
- [8] S.M. Sze, "VLSI Technology," *John Wiley Co.* New York pp. 242 (1983)