Journal of the Korean Ceramic Society
Vol. 32, No. 12, pp. 1377~1382, 1995.

고에너지 P이온 주입한 실리콘에 형성된 격자 결함에 관한 고분해능 투과전자현미경 연구

장기완 · 이정용 · 조남훈* · 노재상*
한국과학기술원 재료공학과
*홍익대학교 금속재료공학과
(1995년 9월 18일 접수)

A High-Resolution Transmission Electron Microscopy Study on the Lattice Defects Formed in the High Energy P Ion Implanted Silicon

Ki Wan Jang, Jeong Yong Lee, Nam Hun Cho* and Jae Sang Ro*
Dept. of Mater. Eng., Korea Advanced Institute of Sci. and Tech.
*Dept. of Metallurgy and Mater. Eng., Hong-Ik Univ.
(Received September 18, 1995)

요 약

고에너지로 P 이온을 주입한 실리콘에 생긴 격자 결함들을 고분해능 투과전자현미경을 사용하여 원자 단위로 연구한 결과 다음과 같은 사실들을 밝혔다. 열처리를 하지 않은 시편에서 Lomer 전위, 60° 완전 전위, 60° 전위 쌍극자, 외부 적층 결함등이 이온 투영 범위 근처에 집중되어 형성되었다. 이온 주입 후 열처리시 침입형 Frank 루프, 60° 완전 전위, 60° 전위 쌍극자, 적층 결함, 석출물, 완전 전위 루프, 〈112〉 막대 모양 결함등이 열처리 온도 및 시간에 따라 이온 투영 범위 근처에 집중되어 존재하였다. 이 결과로 점 결함 군집체 뿐 아니라 확장된 이차 결함들이 열처리하지 않은 상태에서 형성될 수 있음을 밝혔다. 550℃ 정도의 저온 열처리로도 작은 침입형 Frank 루프가 형성되고, 700℃ 열처리시 석출물들이 형성되었다. 1000℃, 1시간 열처리시 결함띠는 이차 결함들의 분포에 따라 두 부분으로 나누어졌다.

ABSTRACT

A high-resolution transmission electron microscopy study on the lattice defects formed in the high energy P ion implanted silicon was carried out on an atomic level. Results show that Lomer dislocations, 60° perfect dislocations, 60° dislocation dipole and extrinsic stacking fault formed in the near R_p of as-implanted specimen. In the annealed specimens, interstitial Frank loops, 60° perfect dislocations, 60° dislocation dipoles, stacking faults, precipitates, perfect dislocation loops and 〈112〉 rodlike defects existed exclusively near in the R_p with various annealing temperature and time. From these results, it is concluded that extended secondary defects as well as the point defect clusters could be formed without annealing. Even at low temperature annealing such as 550℃, small interstitial Frank loops could be formed and precipitates were also formed by 700℃ annealing. The defect band annealed at 1000℃ for 1 hr could be divided into two regions depending on the distribution of the secondary defects.

Key words*: *High energy ion implantation, HRTEM, Lattice defects

1. 서 론

1 MeV 이상의 고에너지 이온 주입 기술은 retrograde well 형성 및 buried layer 형성에 응용되어 차세대 반도체 제작 기술로 최근 각광받고 있다. 또한 고에너지 이온 주입 기술의 응용은 소자의 집적도 증가, 제조 공정의 단순화, 고온 공정의 생략, 소자 활성 영역(active region)에 존재하는 불순물이나 결함들을 비활성 영역(inactive region)으로 고립시켜 존재 범위를 제한(localize)시키는 gettering등의 많은 장점이 있다[1]. 하지만,

고에너지 이온 주입후 열처리시 기존의 저에너지 이온 주입의 경우와는 달리, R_p(projected range) 근처에 매우 안정한 이차 결함(secondary defect)들이 형성되므로, 이에 관한 연구가 선행되어야 한다. 지금까지 이차 결함층의 수직 깊이나 열처리 조건에 따른 거동 및 조직 변화 양상등에 대한 투과전자현미경 연구는 보고되었으나[2-5] 저에너지 이온 주입시의 결함 연구에 비하면 매우 부족하고, 고에너지 이온 주입시의 이차 결함에 대한 고분해능 투과전자현미경 연구는 거의 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 실리콘 기판에 3 MeV의 고에너지로 P이온을 주입하고, 열처리 전후에 존재하는 결함들을 고분해능 투과전자현미경을 사용하여 원자 단위로 연구하였다.

2. 실험방법

비저항 20~30 Ωcm를 갖는 CZ(Czochralski) p형 (100) 실리콘 웨이퍼에 Tandem Accelerator를 사용하여 3 MeV의 에너지 및 1×10^{15} ions/cm^{2}의 조사량으로 P이온을 주입하였다. 이온 주입시 +2가의 이온을 사용하였고 이온빔에 의한 열처리 효과를 막기 위해 전류 밀도는 0.17 μA/cm^{2}로 하였다. 시편의 열처리는 550~1000℃에서 30~60분간 진공 로에서 하였다

시편의 결함 관찰을 위해 단면 분석용 투과전자현미경 시편을 face to face 방법으로 제작하여 이온 연마하였다. JEOL사의 JEM 2000EX 모델의 투과전자현미경을 사용, 고분해능 투과전자현미경상을 얻었다. JEM 2000EX의 필라멘트는 pointed LaB_6이고 200 KeV에서 동작되며 점 분해능(point resolution)은 0.21 nm이다.

3. 관찰 및 결과

Fig. 1은 3 MeV, 1×10^{15} ions/cm^2 P이온 주입시 열처리 조건에 따른 실리콘 기판의 단면 투과전자현미경 명 시야상(bright-field image)이다. 사진에서 표면으로부터 약 2.3 μm를 중심으로 분포하고 있는 검은 명암을 보이는 지역은, 점 결함 군집체(point defect clusters)들이 존재한다고 보고된[2,3,5] 결함띠로서 사진에 DR(Defect Region)로 표시하였다. 사진에서 보면, 열처리 온도 증가에 따라 결함띠의 폭이 상단부로부터 조금씩 줄어드나 결함띠의 하단부는 거의 움직이지 않았다. 결함띠 외 사진에 나타난 검은 선들은 시편의 국부적 두께 변화에 기인한 두께 줄무늬(thickness fringe) 또는 시편의 국부적 휨(bending)에 따른 moiré 줄무늬로서, 이온 주입에 의해

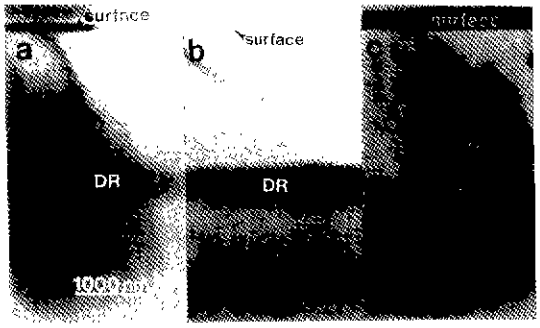

Fig. 1. Bright-field cross-sectional TEM micrographs of the silicon specimens implanted with 3 MeV P at a dose of 1×10^{15} ions/cm^2 (a) as-implanted (b) 550℃-30 min.-Anneal (c) 700℃-30 min.-Anneal.

실리콘에 형성된 격자 결함과는 무관하다.

Fig. 2(a)는 이온 주입된 시편의 결함띠내에 존재하는 결함을 확대한 고분해능 투과전자현미경 상이다. 사진내의 흰 점 또는 검은 점은 1/4a〈110〉만큼 떨어져 있는 실리콘 원자쌍 또는 6개의 실리콘 원자들로 둘러싸인 육각형의 통로(channel)이다. 여기서는 실리콘 원자쌍이 흰 점과 검은 점 둘 중 어디에 해당하는가는 고려하지 않았다. 왜냐하면, 흰 점과 검은 점 모두 그 배열을 통해 실리콘 원자들의 적층 순서를 알 수 있기 때문에 격자 결함의 해석에 큰 영향이 없기 때문이다. 사진내의 최근접한 흰 점들은 실리콘 {111} 면을 이루며, 서로 70.5°를 이루는 두 개의 {111} 면이 사진내에 존재하게 된다. 다이아몬드 격자 구조에서 층상구조는 AaBbCcAaBbCc의 순서를 갖는 {111} 면들로써 이루어져 있다. 이 구조를 {111} 면에 수직한 방향에서 관찰하면 A와 a, B와 b, C와 c는 같은 자리에 위치하므로, 적층 순서를 Aa, Bb, Cc와 같은 이중 지수 정의(double index notation)를 없애고 A, B, C등의 한 문자가 Aa, Bb, Cc와 같은 한 쌍의 원자층을 나타내는 ABCABC로 표현할 수 있다. 사진의 흰 점들 위에 작은 검은 원들을 일대일로 중첩시켜 나타낸 원자들의 적층 순서를 살펴보면, 완전한 실리콘 격자에 화살표로 표시한 잉여 반면(extra half plane)들이 끼어들었음을 알 수 있다. {111} 면들이 잉여 반면을 형성하며 결함을 이루는 개략도를 Fig. 2(b)와 2(c)에 나타내었다. 잉여 반면들인 두 {111} 면이 모이는 곳을 둘러 싸는, 흰 점들 위에 일대일로 중첩시켜 표시한 작은 검은 원들을 이어 가면서 버거스 회로를 그려본 결과, 끝점과 시작점을 잇는 변위 벡터가 a/2〈110〉이었다. 본 실험에서 전자빔이 실리콘 결정의 〈110〉 방향으로 입

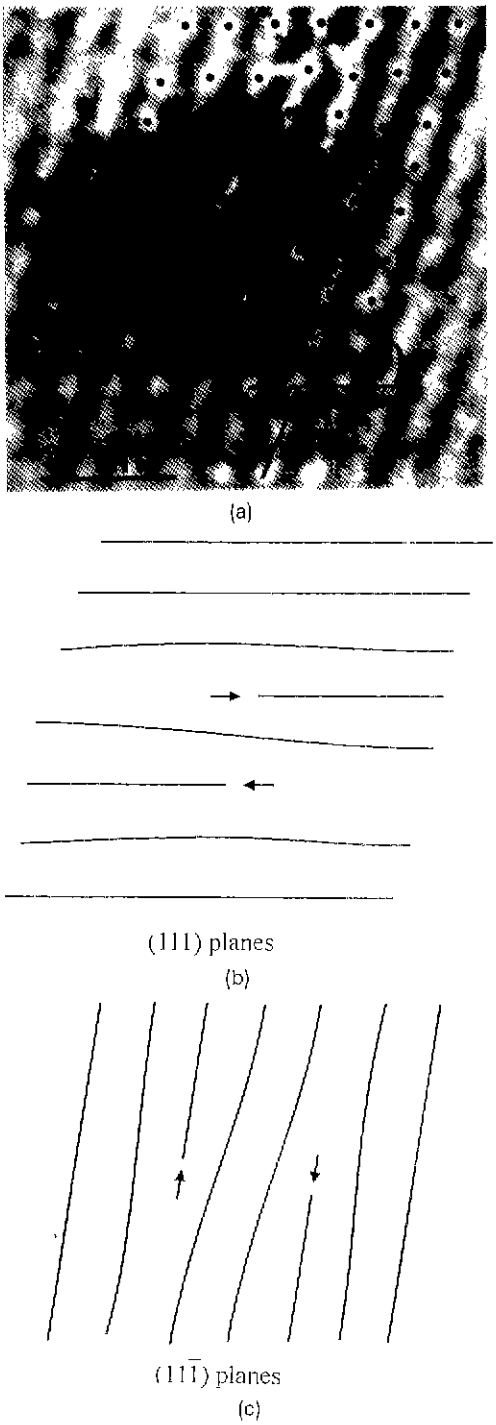

Fig. 2. (a) High-resolution TEM micrograph of Lomer dislocations in the as implanted specimen. (b) a schematic diagram of (111) extra half planes. (c) a schematic diagram of (11$\bar{1}$) extra half planes.

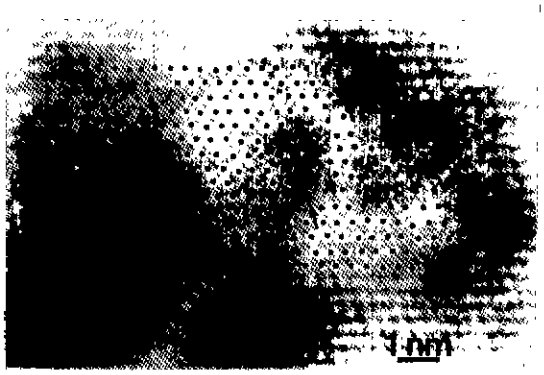

Fig. 3. High-resolution TEM micrograph of defects in the as implanted specimen.

사하므로 정대축(zone axis)의 방향을 [1$\bar{1}$0]으로 놓을 수 있고, 이 때 전자빔의 방향은 사진을 바라보는 방향인 [$\bar{1}$10]이 된다. 따라서 전자빔 방향에 수직인, edge 성분만을 가지는 Lomer 전위의 중심부(core)가 두 화살표가 모이는 곳에서 존재함을 확인하였다. Lomer 전위는 [011] 방향으로 놓여 있고 (100) 면을 슬립면을 가지며 변형된 실리콘과 게르마늄에서 주로 발견되었다[9]. Lomer 전위의 중심부의 [001] 방향을 기준으로 전위 중심부 양쪽의 (001) 면의 원자 배열은 비대칭성(asymmetry)을 나타내었다. 버거스 벡터가 반대 부호인 이 두 Lomer 전위 사이에 있는 (11$\bar{1}$) 면의 격자 배열은 심하게 변형되어 있다. 이 두 Lomer 전위쌍을 둘러싸는 버거스 회로를 그리면, 버거스 벡터는 0이고 잉여 반면은 존재하지 않는다.

이온 주입된 시편의 결함따내 다른 부분에서 존재하는 결함들을 고분해능 투과전자현미경으로 관찰하여 분석한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2(a)에서와 같이 흰 점들위에 일대일로 중첩시켜 표시한 작은 검은 원들의 적층 순서로 결함의 원자 배열을 분석하였다. 반대 방향의 화살표 두 개가 모이는 곳에 Lomer 전위의 중심부(core)가 존재함을 Fig. 2(a)에서와 같이 버거스 회로를 그려 확인하였다. Lomer 전위와 수 원자쌍만큼 떨어져 있는 반대 방향의 화살표 두 개도 부호가 다른 Lomer 전위 쌍임을 버거스 회로를 그려 확인하였다. 시진에서 왼쪽 하단에 있는 화살표 하나는 잉여 반면을 나타내며, 60° 완전 전위가 존재하였다. Fig. 1과 2의 Lomer 전위들이 공통적으로 전위 중심부의 [001] 방향을 기준으로 전위 중심부 양쪽 (001) 면의 원자 배열이 비대칭성을 나타내, Lomer 전위가 1/2〈110〉→1/3〈111〉+1/6〈11$\bar{2}$〉의 반응식[9]에 의해 생성되었다고 추정된다. 사진에서 전위를 포함하는 영역의 전체적 원자 배열이 심하게 변형되어

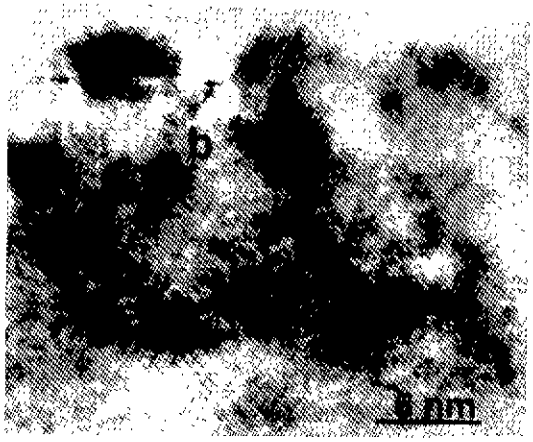

Fig. 4. High-resolution TEM micrograph of defects in the as implanted specimen.

이온 주입에 따른 격자 변형이 매우 큼을 정성적으로 알 수 있다.

이온 주입된 시편의 결함띠내 다른 부분에서 존재하는 결함들을 고분해능 투과전자현미경으로 관찰하여 분석한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. {111} 면을 나타내는 검은 줄무늬들이 완전한 격자에 끼어들어 잉여 반면을 형성하는데, 이들을 화살표로 표시하였다. a로 표시한 곳에서는 60° 완전 전위가 존재하였는데, 이들은 결함띠내 여러 군데에 흩어져 존재하였다. 부호가 다른 버거스 벡터를 갖는 60° 완전 전위쌍이 전위 쌍극자(dislocation dipole)를 형성하고 있는데, 이를 b로 표시하였다. 또, 적층 순서가 외부적 특성(extrinsinc characteristics)을 보이는 {111} 면상의 적층 결함도 관찰하였는데, 이를 c로 표시하였다. 이 적층 결함 오른쪽 끝에는 30° 부분 전위가, 왼쪽 끝에는 90° 부분 전위가 존재하고 이를 화살표로 표시하였다. 따라서 이 적층 결함은 60° 완전 전위가 다음 식에 의해 분해되어 형성된 것이다.

$$a/2\langle 110\rangle \rightarrow a/6\langle 112\rangle + a/3\langle 11\bar{1}\rangle \quad CA \rightarrow C\delta + \delta A$$

Fig. 5는 550℃, 30분 열처리한 시편에서 관찰한 결함띠내의 결함을 확대한 고분해능 투과전자현미경 상이다. 방향이 반대인 화살표 2개가 각각 잉여 반면의 존재를 나타내는, 60° 전위 쌍극자가 존재하였다.

Fig. 6은 550℃, 30분 열처리한 시편에서 관찰한 결함띠내의 대표적 결함을 확대한 고분해능 투과전자현미경 상이다. 두 화살표 사이의 격자 배열을 나타내는 검은 점들의 적층 순서는 ABCABACABC로 완전한 격자에 하나의 원자층 A가 끼어들어 있다. 사진과 같이 검은 점위에 일대일로 중첩시켜 표시한 작은 원을 표시하여

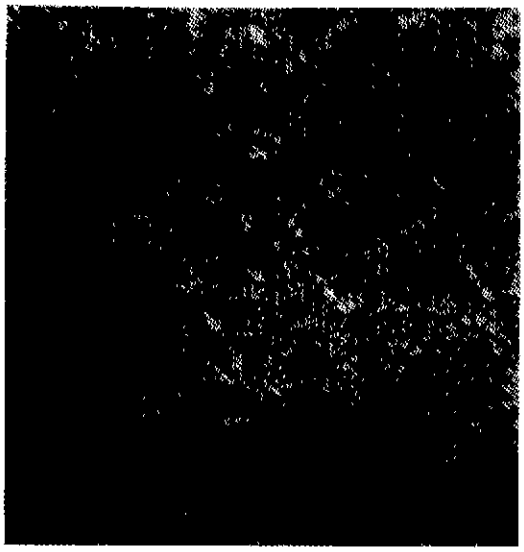

Fig. 5. High-resolution TEM micrograph of 60 perfect dislocations in the 550℃-30 min annealed specimen.

Fig. 6. High-resolution TEM micrograph of Frank loop in the 550℃-30 min annealed specimen.

원자들의 적층 순서를 분석한 결과, 결함 주위의 완전한 격자의 검은 점들의 갯수는 9개이고, 결함 부분의 검은 점들의 갯수는 10개이었다. 이상의 분석에서, 이 결함은 침입형 성질을 갖고, 결함을 둘러싸는 버거스 회로는 완전한 격자의 것과 같아 전위 루프임을 알았다. 따라서 이 결함은 지름이 10 nm 이하인, 버거스 벡터 $\vec{b}=a/3\langle 111\rangle$를 갖는 Frank 부분 전위가 화살표 양 끝에 존재하는 침입형 Frank 루프이다. 사진의 분석 결과는 면심입방 구조를 갖는 금속에서 나타나는 침입형 Frank 루프의 원자 구조과 일치한다.

Fig. 7은 700℃, 30분 열처리한 시편의 단면 투과전자

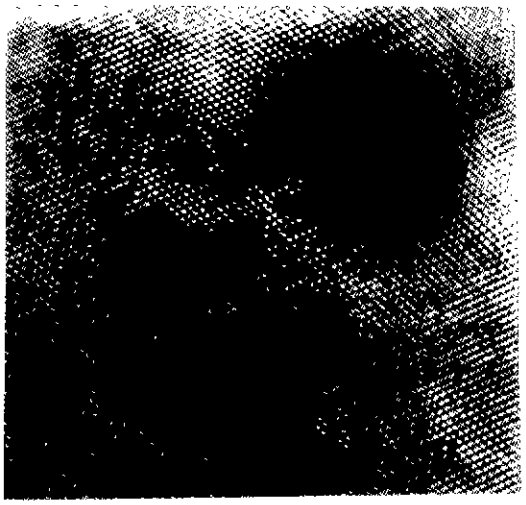

Fig. 7. High-resolution TEM micrograph of defects in the 700℃-30 min annealed specimen.

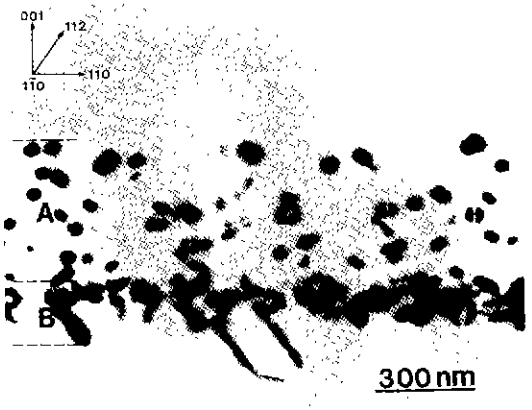

Fig. 8. Bright-field cross-sectional TEM micrograph of defect band in the 1000℃-60 min annealed specimen.

힌미경 상의 결함띠 내에서 검은 점 결함 군집체처럼 보이는 결함을 확대한 고분해능 투과전자현미경 상이다. 결함은 검은 명암(contrast)의 반원 2개가 지름이 4 nm 내외의 원을 이루는 형태이다. a에서는 화살표로 표시한 검은 줄무늬가 잉여 반면을 형성하고 있으며 60° 완전 전위가 화살표 끝에 존재한다. 잉여 반면을 지름으로 하여 원형으로 나타나는 검은 명암은 전위 주위의 변형장(strain field)에 기인한다. b에서는 원형의 석출물이 존재하는데, 모재(matrix)의 {111} 면의 갯수보다 석출물내 {111} 면의 갯수가 하나 더 많아 침입형 성질을 갖고, 모재와 결합간 경계에서 〈112〉 방향으로 {111} 면들의 연속성은 석출물이 원자적으로 모재와 잘 일치함을 나타낸다. 이 석출물은 지름이 4 nm 정도로 크기가 너무 작아 결정학적, 화학적 분석을 할 수 없었지만, 실리콘 내 소량 존재하던 빠른 확산자(fast diffuser)들인 전이 금속(Fe, Cu, Co, Ni등) 중의 한 원소가 이차 결함 주위의 변형장(strain field)에 gettering 되어 형성한 것으로 추정된다. 본 실험의 석출물은 Si/Si(Ge)/Si epitaxial heterostructures 시편을 700℃, 1시간 진공 열처리시 계면의 격자 불일치 전위(misfit dislocation)에 편석된 trace iron 석출물($FeSi_2$)과 거의 유사하다[7].

Fig. 8은 1000℃, 60분 열처리한 시편에서 관찰한 결함띠를 확대한 단면 투과전자현미경 명시야상이다. 결함띠의 수직 깊이는 열처리 전 및 1000℃ 이하 열처리시의 것들과 거의 같았다. 결함띠내 전체에 고르게 분포하는 평균 지름 50 nm 이하의 버거스 벡터 $\vec{b}=a/2\langle 110\rangle$를 갖는 완전 전위 루프를 나타내는 명암을 관찰하였는데, 결함띠와 모재의 아래쪽 계면에서는 〈112〉 방향으로 뻗은 막대 결함들이 완전 전위 루프들과 함께 공존하며 고밀도의 결함띠를 형성하였다. 이 전위 루프들은 대부분 침입형 성질을 갖는 prismatic 전위 루프라고 보고되었다[5]. 완전 전위 루프의 생성은 $a/3\langle 111\rangle + a/6\langle 11\bar{2}\rangle \rightarrow a/2\langle 110\rangle$의 반응식에 따른다. 결함띠의 아래 계면에는 기판쪽으로 〈112〉 방향으로 놓인 장축의 길이가 600 nm 정도로 크게 성장한 육각형 prismatic 루프도 존재하였다. 결함띠 내의 이러한 이차 결함 분포 양상으로 결함띠를 A, B 두 부분으로 나누었다. 그림에 A로 표시한 부분은 작은 전위 루프들이 고르게 흩어져 존재하는 결함띠의 상단부이다. B로 표시한 부분은 작은 전위 루프, 성장한 전위 루프, 〈112〉 막대 결함들이 공존하는 결함 밀도가 높은 결함띠의 하단부이다. Fig. 1에서 이온 주입 직후의 결함띠가 열처리 온도 증가에 따라 결함띠의 폭이 상단부로부터 줄어들고 결함띠의 하단부는 거의 안 움직인 점과 1000℃ 열처리시 결함띠 상단부의 결함 밀도가 결함띠 하단부의 그 것보다 현저히 낮은 결과로부터 이온 주입으로 인해 과도한 실리콘 침입형 원자들이 최대로 밀집한 결함띠/모재 아래쪽 계면에 존재하는 결함들은 결함간 강한 상호 작용으로 완전히 제거하기 힘들고, 나머지 결함띠 부분에 존재하는 결함들은 1000℃, 60분 열처리보다 더 고온, 장시간 열처리로 제거할 수 있음이 예상된다.

4. 분석 및 검토

열처리를 하지 않은 시편의 결함띠내 Lomer 전위, 60°

완전 전위, 60° 전위 쌍극자, 외부 적층 결함은 지금까지 보고된 바가 없으며, 본 실험에서 처음으로 관찰한 결함들이다. 지금까지 고에너지 이온 주입 실험에서 보고된 일차 결함(primary defect)들은 Frenkel 결함 또는 점 결함 군집체등이었다. 본 실험의 이온 주입된 시편내 확장된 결함들(extended defects)은 이온 빔에 의한 열처리 효과나 시편 제작상의 열처리 효과(<200℃)로 형성되었거나, 이온 주입전부터 R_p 부근에 존재하였다고는 설명할 수 없다 기판 내에 불순물로 존재하는 산소는 격자 결함의 핵 생성을 돕는다고 알려져 있고, 본 실험에 사용한 실리콘 기판의 산소 농도는 대략 20 ppm 이상으로, 매우 높은 수치이다. 따라서 1×10^{15} ions/cm^{2}의 비교적 고농도 이온 주입으로 인해 R_p 부근의 격자에 걸린 높은 변형량과 기판 내 고농도의 산소 원자들이 점 결함이나 점 결함 군집체들을 Lomer 전위나 60° 완전 전위로 변화시키는 구동력으로 작용했다고 판단된다.

Tamura는 고에너지 P이온 주입시 750℃ 이상의 열처리로 이온 주입된 층에 이차 결함들이 형성되고, 700℃ 이하의 열처리로는 TEM으로 관찰할만한 어떠한 결함도 형성되지 않는다고 보고하였다[4]. 하지만 본 연구 결과, 700℃는 물론이고 550℃의 저온 열처리로도 다양한 격자 결함들이 이차 결함띠내에 존재함을 밝혔다. 550℃ 열처리시 전위 쌍극자가 존재하고, 550℃ 열처리시 존재하던 60° 완전 전위 같은 선 결함이 700℃ 열처리시에도 존재하며, 700℃ 열처리시 석출물이 형성되는 것등은 Seshan과 Washburn이 제시한 저에너지 이온 주입시 이차 결함 발달의 3단계 모델과는 많은 차이를 보인다[8]. 따라서, 고에너지 P이온 주입후 열처리 온도 변화에 따라 형성되는 격자 결함의 형태 및 변화 양상은 저에너지의 그 것과는 많은 차이가 예상된다. 열처리 전후 결함띠내에 나타나는 결함들이 거의 모두 침입형인 것은, 이온 주입으로 인한 과잉의 실리콘 침입형 원자들에 기인한다. 이러한 R_p 부근에 집중된 과잉의 침입형 원자들 때문에 이온 주입 직후 존재할 수 있는 공공 군집체(vacancy cluster)나 공공 루프(vacancy loop)는 열처리 온도 및 시간이 증가할수록 소멸되고, 침입형 군집체나 침입형 루프는 계속 성장하는 것이다.

5. 결 론

3 MeV의 고에너지로 P이온을 1×10^{15} ions/cm^{2}의 조사량으로 실리콘에 주입하고, 열처리 전후 R_p 부근의 결함띠에 존재하는 격자 결함들을 고분해능 투과전자현미경을 사용하여 원자 단위로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

이온 주입된 시편에는 기존에 보고된 점 결함 군집체 외에 Lomer 전위, 60° 전위, 60° 전위 쌍극자, 외부 적층 결함등이 존재한다. 550℃, 30분 저온 열처리시 대부분의 결함은 침입형 Frank 루프이며, 이 외에도 60° 전위 쌍극자, 적층 결함등이 존재한다. 700℃, 30분 열처리시 석출물과 60° 전위가 존재한다. 1000℃, 60분의 고온, 장시간 열처리시 결함띠내에는 완전 전위 루프가 전체적으로 고르게 분포되어 있고, 결함띠/모재 아래쪽 계면에서는 막대 모양 결함과 완전 전위 루프가 공존하며 고밀도의 결함띠를 형성한다.

감사의 글

본 연구는 상공부, 체신부, 과학기술처에서 공동으로 시행한 차세대 반도체 기반 기술 공동개발 사업의 지원과 한국과학재단의 재료계면공학연구센터의 연구비 지원에 의하여 수행된 연구 결과의 일부이며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. 조남훈, 장기완, 김창수, 이정용, 노재상, "3 MeV P^+ 이온 주입된 실리콘의 열처리에 따른 X-ray Rocking Curve 분석," 한국진공학회지, **4**(1), 109-117 (1995).
2. M. Tamura, N. Natsuaki, Y. Wada and E. Mitani, "Depth distribution of secondary defects in 2-MeV boron-implanted silicon," *J Appl. Phys.*, **59**(10), 3417-3420 (1986).
3. M. Tamura and N. Natsuaki, "Secondary defects in 2 MeV phosphorus implanted silicon," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **25**(6), L474-L477 (1986).
4. W. Skorupa, E. Wieser, R. Groetzschel, M. Posselt, H. Buecke, A. Armigliato, A. Garulli, A. Beyer and W. Markgraf, "High energy implantation and annealing of phophorus in silicon," *Nucl. Instr. and Meth.*, **B19/20**, 335-339 (1987).
5. M. Tamura, N. Natsuaki, Y. Wada and E. Mitani, "MeV-energy B^+, P^+ and As^+ ion implantation into silicon," *J Appl. Phys*, **59**(10), 3417-3420 (1987).
6. A. Bourret, J. Desseaux and A. Renault, "Core structure of the Lomer dislocation in germanium and silicon," *Phil. Mag. A*, **45**(1), 1-20 (1982).
7. D.M. Lee and G.A. Rozgonyi, "Low-temperature gettering of trace iron and copper by misfit dislocation in Si/Si(Ge) epitaxy," *Appl Phys. Lett*, **65**(3), 350-352 (1994).
8. K. Seshan and J. Washburn, "A three-stage model for the developement of secondary defects in ion-implanted silicon," *Rad Effects.*, **37**, 147-153 (1978).