

論文97-34D-5-5

이온 주입 시의 점결함 발생과 재결합에 관한 3차원 몬테 카를로 모델링 및 시뮬레이션

(Three-Dimensional Monte Carlo Modeling and Simulation of Point Defect Generation and Recombination During Ion Implantation)

孫明植*, 黃好正*

(Myung-Sik Son and Ho-Jung Hwang)

요 약

이온 주입 공정에서의 도즈(dose)에 따른 불순물 농도 변화 분포 및 이온 주입 과정에서 발생하는 점결함(point defect) 분포를 물리적 토대의 몬테 카를로 모델링을 통하여 정확히 예측하기 위하여 효율적인 3차원 완전 역동 손상 모델(3D Full-Dynamic Damage Model)을 제안하였고, 이를 통해 B 및 BF2 이온 주입 시의 도즈에 따른 불순물 분포 및 점결함 분포를 계산하였다. 개발된 모델을 통한 점결함 분포와 Kinchin-Pease 식을 이용한 해석적 점결함 분포와의 차이를 1차원 측정치(SIMS)와 함께 비교하였다. 비교된 결과에 의하면 제안된 모델을 통한 점결함 농도 분포는 Kinchin-Pease 식에 의한 분포 보다 낮게 나타나고 있으며, 결공(vacancy) 분포와 틱새(interstitial) 분포가 대략 $0.8 \cdot Rp$ (peak ion concentration range) 지점을 중심으로 실리콘 벌크 방향으로 틱새가 실리콘 표면 방향으로 결공 분포가 높게 나타났다. 완전 역동 손상 모델은 이온 및 반동 실리콘의 궤적을 모두 추적하며, 동시에 누적되는 점결함의 영향을 고려한 이온 궤적의 채널링(channeling) 및 디채널링(dechanneling), 리채널링(rechanneling)의 과정을 점결함 분포 확률을 도입하여 역동적으로 고려하고 있다. 또한, 상온 이온 주입 시의 웨이퍼 온도에 의한 틱새-결공(interstitial-vacancy) 간의 재결합(self-annealing)에 기인한 점결함 분포의 포화 준위(saturation level)효과도 고려되었다.

Abstract

A three dimensional(3D) full dynamic damage model for ion implantation in crystalline silicon was proposed to calculate more accurately point defect distributions and ion implanted concentration profiles during ion implantation process. The developed model was based on the physical Monte Carlo approach. This model was applied to simulate B and BF2 implantation. We compared our results for damage distributions with those of the analytical Kinchin-Pease approach. In our result, the point defect distributions obtained by our new model are less than those of Kinchin-Pease approach, and the vacancy distributions differ from the interstitial distributions. The vacancy concentrations are higher than the interstitial ones before $0.8 \cdot Rp$ to the silicon surface, and after the $0.8 \cdot Rp$ to the silicon bulk, the interstitial concentrations are reversely higher than the vacancy ones. The full-dynamic damage model for the accumulative damage during ion implantation follows all of the trajectories of both ions and recoiled silicons and, concurrently, the cumulative damage effect on the ions and the recoiled silicons are considered dynamically by introducing the distribution probability of the point defect. In addition, the self-annealing effect of the vacancy-interstitial recombination during ion implantation at room temperature is considered, which resulted in the saturation level for the damage distribution.

* 正會員, 中央大學校 電子工學科 半導體 工程·素子 研究室

(Semiconductor Process and Device Lab., Dept. of Electronic Eng., Chung-Ang University)

※ 본 논문은 서울대학교 반도체 공동 연구소의 교육

부 반도체 연구분야 학술연구 조성비(과제 번호: ISRC 95-E-1032)와 한국 과학재단 핵심 전문 연구과제(과제번호 951-0911-071-2)에 의해 수행되었습니다.

接受日字:1997年1月3日, 수정완료일:1997年5月2日

I. 서 론

ULSI 및 GSI 시대의 고집적 반도체 소자 제조에 있어서 이온 주입 공정은 뒤이어 수반되는 공정에서 열적 확산을 최소화할 수 있도록 깊이 및 측면 농도 분포를 정밀하게 제어해 줄 필요성이 있다. 이러한 공정 특성을 만족시켜 주기 위해서는 주입되는 도펀트(dopant)의 에너지와 도즈에 따른 불순물 분포 및 이에 수반되어 발생하게 되는 점결함 분포를 예측 이해할 필요가 있다. 단결정 실리콘 웨이퍼로의 이온 주입 공정에서 주입된 이온 불순물 분포 및 점결함 분포에 대한 예측은 불순물-결공(impurity-vacancy) 및 불순물-틈새(impurity-interstitial)간의 상호 작용에 의한 불순물 확산 메커니즘과 이온 주입 과정에서 발생하는 결함에 기인한 RTA(Rapid Thermal Annealing) 공정에서의 이상 확산 현상인 TED (Transient Enhanced Diffusion) 확산 메커니즘에 대한 물리적 이해를 돕는 중요한 정보^[1-4]가 될 것으로 기대된다.

이진-충돌(binary-collision) 근사를 가정한 몬테 카를로(Monte Carlo) 컴퓨터 시뮬레이션은 이온 주입된 불순물의 3차원 궤적을 추적할 수 있을 뿐만 아니라 이온과 실리콘 원자간의 핵 충돌에 의해 격자를 이탈하여 반동되는 실리콘 원자의 궤적 또한 추적할 수 있으므로 해서 보다 정확한 물리적 토대의 이온 주입 공정 묘사가 가능하다. 그러나, 현재 3차원 불순물 분포 및 이온 주입 공정에서 발생하는 점결함 분포를 측정할 수 없는 실정에서 몬테 카를로 시뮬레이션 모델이 보다 정확한 불순물 분포 및 점결함 분포에 대한 정보를 제공해 주기 위해서는 주입된 불순물 및 반동된(recoiled) 실리콘 원자에 대한 궤적 추적과 함께 3차원 격자 구조의 비정질화(amorphization) 정도를 효율적이며 정확하게 묘사할 수 있어야만 한다. 따라서, 정확성과 효율성을 동시에 고려한 이온 주입 공정 모델링을 통한 컴퓨터 시뮬레이션이 필수적이다.

효율적이며 역동적으로 손상 구조를 묘사하면서 누적되는 격자 손상 정도를 정확하게 시뮬레이션 하기 위한 기존의 한 방법^[1-2]은 수행 시간을 증가시키지 않기 위해 격자를 이탈한 실리콘 원자가 비행하며 만들어 내는 연속 충돌 궤적을 추적하는 대신 핵 충돌 전이(轉移) 에너지 량으로 결공-틈새 쌍(Frenkel-Pair)의 수를 결정하는 Kinchin-Pease 점결함 모델을 이용하여 격자 손상 정도를 모델링 하고 있다. 그러나,

이러한 Kinchin-Pease 점결함 분포는 일반적으로 실험치에 비해 많은 것으로 여겨지고 있는 데, 이는 실제 상온 이온 주입 공정에서의 단결정 실리콘 구조와 웨이퍼 온도에 의한 결공-틈새 간의 재결합 가능성이 고려되지 않은 데 그 원인이 있다고 여겨진다. 주입되는 이온에 따라 변수(factor)들을 사용하여 이러한 사실들을 보완적으로 고려하므로 모델의 일관성이 결여되고 있다. 또 다른 방법^[3-4]은 Kinchin-Pease 점결함 분포 대신 직접 모든 움직이는 원자들의 궤적을 추적하고, 이때 발생한 틈새-결공 분포에 대한 재결합 반경(capture radius)을 정의하여 재결합으로 인한 소멸 효과를 고려하고, 안정되게 존재하는 결공과 틈새 분포에 따라 격자 손상 정도를 묘사하고 있다. 그러나, 이 방법을 적용한 모델은 정확하다는 장점은 있지만 3차원 시뮬레이션을 수행하는 경우 이온 주입 영역에 비해 한 메모리의 한계성^[5]을 가지고 있다.

본 논문에서는 이러한 모델들의 문제점들을 극복하면서 이온 주입되는 도즈(dose)량에 따른 불순물 농도 분포 및 이온 주입 과정에서 발생하는 점결함 분포를 효율적이며 정확하게 예측하기 위하여 완전 역동 손상(Full-Dynamic Damage) 모델을 제안하고, 이를 통해 B 및 BF₂ 이온 주입 시의 도즈에 따른 불순물 분포 및 점결함 분포를 계산하였다. 제안한 모델은 Kinchin-Pease 모델을 이용한 방법^[1-2]에 비해 모든 움직이는 원자의 궤적을 추적함으로써 점결함 분포에 대한 정확성을 높였으며, 문헌 [4-5]에서의 모델에 비해 효율적인 충돌 탐색을 위한 결공 위치와 틈새 위치를 고려하였으며, 동시에 3차원 시뮬레이션의 한계 중 하나인 메모리 문제를 극복하였다. 본 모델은 3차원 시뮬레이션 영역이 증가하더라도 수행 시간과는 무관하게 충돌 탐색이 가능하며, 점결함 분포에 대한 영향은 확률을 도입함으로써 시뮬레이션 수행 시간을 개선할 수 있었다. 개발된 완전 역동 손상 모델은 이온 및 반동 실리콘의 궤적을 모두 추적하며, 이 과정에서 얻어진 결공 및 틈새 분포 확률을 이용하여 역동적으로 격자 손상 구조를 고려한다. 또한, 웨이퍼 온도에 의한 틈새-결공(interstitial-vacancy) 간의 재결합으로 인한 점결함 분포의 포화 준위(saturation level) 효과^[3-4]도 고려되었다.

단결정 실리콘의 방향성을 고려한 컴퓨터 시뮬레이션 코드로는 CTRIM MC 코드^[2,6-7], UT-MARLOWE 코드^[3-4], IMSIL MC 코드^[1] 등이 있으나

본 연구실에서는 자체적인 3차원 MC 이온 주입 시뮬레이션 코드인 TRICSI(Transport Ions into Crystal Silicon)를 개발하였고^[8], 3차원 마스크 구조를 고려한 점결합 분포 및 이온 주입된 불순물 분포를 발표^[9-10]한 바 있다. 일반적인 이온 주입 공정에 대한 몬테 카를로 TRICSI 모델은 참고 문헌 [8-10]을 참조하면 되므로, 공정 조건 중 중요한 변수인 도즈에 따른 불순물 분포 의존성을 모델링한 새로운 완전 역동 손상 모델만 언급하기로 한다.

II. 3차원 완전 역동 손상 모델링

입사되는 이온이 실리콘 원자간 결합 에너지(15 eV) 이상의 에너지를 단결정 격자 위치의 정지 실리콘 원자에 전달하게 되면 실리콘 원자는 격자의 위치를 이탈하여 빈 격자, 즉 결공(vacancy)을 발생시키고 산란하게 된다. 만약 반동된 실리콘 원자가 충분한 에너지를 가지고 있다면 또 다른 실리콘 원자와 충돌하면서 연속적으로 격자 손상을 일으키게 된다. 그리고 에너지를 모두 잃으면 자신은 틈새(interstitial)가 된다. 또한, 상온 이온 주입시 웨이퍼 온도에 의한 셀프-어닐링(self-annealing)이 발생하며, 이러한 결공-틈새의 재결합(recombination)으로 인한 점결합의 소멸(annihilation) 효과가 발생한다. 동시에 연이어 주입되는 이온들은 이러한 격자 손상 정도에 따라 채널링(channeling) 및 디채널링(dechanneling), 리채널링(rechanneling) 과정을 겪게 된다. 이러한 점결합 발생이 누적되면서 점차적으로 단결정 실리콘은 비정질화 된다. 이때 국부적인 영역들이 비정질화 되고 이러한 국부 영역(amorphized region or amorphized pocket)들이 확장 결합하여 비정질층(amorphized layer)을 형성하게 된다.

이러한 역동적인(dynamic) 이온 주입 공정에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 이온 주입 과정에서 발생한 격자 손상이 연이어 주입되는 이온 궤적에 미치는 영향을 고려해 주어야만 한다. 이러한 영향 속에는 클러스터(cluster)의 형성, 확장 결합(extended defect) 및 격자 팽창(lattice dilation) 등과 같은 복잡한 결합 효과들을 고려하여야만 하는 데, 본 모델에서는 단지 점결합만을 고려하고, 비정질 영역 또는 비정질층이 형성된 이후 발생하는 점결합은 계산하지 않았다.

발생한 점결합만을 고려하고, 이들의 재결합 소멸 효과만을 고려하는 경우 가장 간단한 방법은 발생한 결공의 위치와 정지한 틈새의 위치를 기억하여 이들이 재결합 반경 R_{cap} 내에서의 소멸 여부를 판단하고, 이들의 위치를 이온 궤적에 반영하여 시뮬레이션 하는 방법^[11]이지만 시뮬레이션 영역이 보다 큰 경우에는 메모리의 한계성을 갖게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 보다 단순한 방법은 국부 영역 속의 결공이나 틈새 농도에 의해 결정되는 재결합 확률 P_{rec} 를 정의하여 재결합 여부를 고려하고 이들의 확률 분포에 따라 결공은 실리콘 격자 위치에 틈새는 실리콘 단위 셀 내의 사면체 결공 위치에 발생시켜 고려하는 방법^[13-14]이 있다. 그러나, 이들의 모델에는 결공 및 틈새 위치를 발생시켜 충돌 여부를 판단하고 하나의 이온이 만들어 낸 연속 충돌 궤적의 위치를 기억시켜 소멸 여부를 판단하는 알고리즘을 사용하므로, 3차원 영역으로의 확장이 용이하지 않다는 단점^[15]을 갖는다. 또한, 반동된 실리콘 궤적에 대해서도 격자 손상 효과를 고려하였는지는 정확하게 알 수가 없다. 시뮬레이션에서는 대표 입자(pseudo-particle)를 사용하게 되므로 이러한 반동 궤적에의 격자 손상을 고려하지 않는다면 반동된 실리콘이 만들어 낸 점결합 분포는 실리콘 농도 N_{Si} ($5E22/cm^3$)를 초과하게 되므로 물리적 현상과 일치하지 않게 된다. 이러한 한계들을 극복하고, 효율적이고 정확한 물리적 토대의 일관성 있는 이온 주입 모델링을 위하여 이온 주입된 이온의 궤적 및 반동된 실리콘 원자의 궤적을 모두 추적하고 이때 발생하는 결공과 틈새의 위치를 3차원 단위 체적($\Delta x \Delta y \Delta z$) 속에 저장하고, 3차원 국부 영역의 결공 농도(N_V) 및 틈새 농도(N_I)에 따른 통계적 확률에 따라 결공과 틈새의 위치를 고려하여 움직이는 모든 원자(이온 및 반동 실리콘) 궤적에 이러한 영향을 고려하였다. 위에서 언급한 자세한 내용을 그림 1에 나타낸 컴퓨터 계산 순서에 따라 서술하면 다음과 같다.

1. 이온 및 반동 실리콘의 궤적을 모두 추적하며, 이때 발생한 결공 및 틈새 정보를 3차원 단위 체적 속에 각각 저장한다. 이때, 대표 입자에 의해 발생한 점결합 농도가 실리콘 농도(N_{Si})를 초과하지 않기 위해 다음과 같은 가중치를 고려하여 적용한다. 이온 주입된 이온이 다음의 경우와 충돌하여 만들어 내는 과정에 대해서 다음과 같은 가중치를 고려하였다.

1) 실리콘 격자 원자가 반동하는 경우—결공 증분

ΔV 만을 증가시킨다. ΔV 는 다시 반동 원자의 가중치 W_{recoil} 이 된다.

$$\Delta V = (1 - P_{vac}) \cdot W_{ion} \quad (1)$$

$$W_{recoil} = \Delta V \quad (2)$$

2) 틈새 원자가 반동하는 경우—틈새 증분 ΔI 만을 감소시킨다. ΔI 는 다시 반동 원자의 가중치 W_{recoil} 이 된다.

$$\Delta I = P_{int} \cdot W_{ion} \quad (3)$$

$$W_{recoil} = \Delta I \quad (4)$$

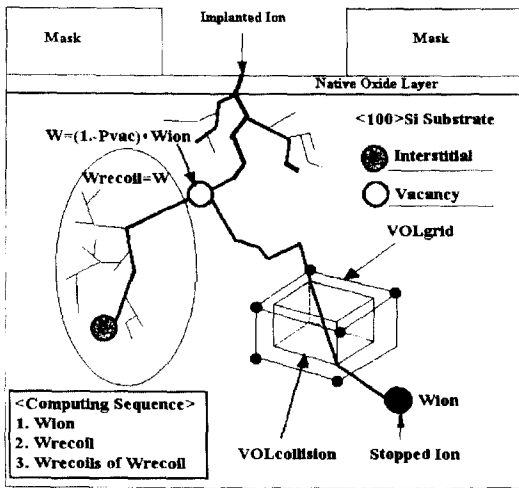


그림 1. 이온 주입된 이온 및 반동 실리콘의 충돌 궤적 및 각 궤적의 컴퓨터 계산순서

Fig. 1. Trajectory branches of implanted ion and recoiled silicon formed due to collisions and computing sequence for the branches.

3) 1) 및 2)의 과정에서 만들어진 비행 원자가 정지하는 경우(틈새의 발생)—틈새 증분 ΔI 만을 증가시킨다.

여기서, 결공 및 틈새가 안정된 상태로 존재하고 있는 확률 P_{vac} 및 P_{int} 은 다음 식으로 정의한다.

$$P_{vac} = V(x,y,z) / N_{Si} \quad (5)$$

$$P_{int} = I(x,y,z) / N_{Si} \quad (6)$$

여기서, $I(x,y,z)$ 및 $V(x,y,z)$ 는 각각 3차원 좌표점 (x,y,z) 가 중심인 단위 정육면체 체적(3차원 단위 체적) 속의 틈새 및 결공 농도이다. 이때, 한 개의 시물레

이션 입자가 갖게 되는 대표 가중치 W_{ion} 은 다음 식으로 결정된다.

$$W_{ion} = \text{이온주입영역(cm}^2\text{)} \cdot \text{이온주입도즈(ions/cm}^2\text{)} / \text{총시물레이션입자수(ions)} \quad (7)$$

2. 반동된 실리콘 각 궤적에서의 연속 충돌이 위에서 언급한 이온이 만드는 충돌 과정을 반복하게 되므로 이 경우에는 식 (1)과 (3)에서 가중치 W_{ion} 을 W_{recoil} 충돌로 바꾸어 계산한다. 이때, 하나의 궤적 가지(branch)에 대한 가중치 W_{recoil} 은 항상 유지된다.

3. 하나의 궤적 가지에 대한 추적(1.절과 2.절의 과정)이 끝난 후, 이 궤적 가지에서 발생한 모든 결공 및 틈새에 대해 재결합 반경 R_{cap} 에 의한 점결합 소멸(셀프-어닐링 효과)을 고려한다.

1) 반동된 초기 결공 위치와 정지한 틈새 위치가 결합 반경 내이면 재결합으로 소멸되었다고 가정하고, ΔV 및 ΔI 만큼을 감소시킨다.

2) 결공이 발생한 경우(1.절에서의 1) 과정) 이미 존재하고 있는 틈새와의 재결합을 0 과 1 사이에 고르게 분포된 난수 Rn (random number)을 사용하여 조건식 (8)을 이용해 결정한다.

$$Rn < P_{reint} \quad (8)$$

식 (8)을 만족하면 재결합이 이루어 졌다고 가정하고, 결공 증분 ΔV 와 같은 틈새 증분 ΔI 만큼을 동시에 감소시킨다.

3) 틈새가 발생한 경우(1.절에서의 3) 과정)에는 이미 존재하고 있는 결공과의 재결합을 난수 조건식 (9)를 이용하여 결정한다.

$$Rn < P_{reovac} \quad (9)$$

식 (9)을 만족하면 재결합이 이루어 졌다고 가정하고, 틈새 증분 ΔI 와 같은 결공 증분 ΔV 만큼을 동시에 감소시킨다.

여기서, 틈새에 대한 재결합 확률 P_{reovac} 및 결공에 대한 재결합 확률 P_{reint} 은 식 (10)과 (11)과 같이 정의한다.

$$P_{reovac} = V(x,y,z) / N_{sat} \quad (10)$$

$$P_{reint} = I(x,y,z) / N_{sat} \quad (11)$$

이때, 결합 반경 R_{cap} 에 의해 결정되는 점결합 포화

준위 농도(saturation level concentration) 점결함 포화 준위 농도 N_{sat} 은 식 (12)에 의해 결정된다^[31].

$$N_{sat} = N_V + N_I = 1 / (4/3 \pi R_{cap}^3) \quad (12)$$

본 논문의 시뮬레이션에서 사용한 재결합 반경은 실리콘 격자 상수의 0.54배(실리콘 격자 상수(5.43095 Å) × 0.54)로 결정하였다.

4. 이온 궤적에의 격자 손상 효과를 고려하기 위해 다음과 같은 알고리즘을 사용하였다. 모든 결공과 틈새의 위치는 재결합 효과가 고려되어 3차원 단위 체적 속에 안정되게 존재하는 형태로 각각 저장되므로, 이러한 결공과 틈새의 통계 확률적 분포를 이온 및 반동 실리콘이 진행하게 되는 영역에 대해 이러한 점결함 정보를 적용한다. 결공은 실리콘 격자 위치에 발생시키며, 틈새는 실리콘 격자 위치를 제외한 위치에 임의 분포한다고 가정한다.

1) 이온 궤적이 단위 체적을 넘어가는 경우 다음 체적을 검출해야 하는 비효율성을 극복하기 위해 격자 손상을 고려하지 않은 이상적인 실리콘 격자 구조에서의 충돌간 거리 L_{ideal} 를 먼저 계산하고, 이후 이 거리를 공간 대각선으로 하는 육면체의 공간 체적 $VOL_{collision}$ 속에서 틈새와의 충돌 여부를 고려한다. 이러한 $VOL_{collision}$ 공간 영역을 포함하며 3차원 단위 체적(VOL_{unit})의 중심점들이 형성하는 가장 작은 공간 체적 $VOL_{grid}(\sum VOL_{unit})$ 을 찾아낸 후, 각 단위 체적 속의 안정된 틈새와 결공 수를 모두 더하여 확장된 체적(VOL_{grid}) 속의 새로운 결공 농도 $N_{vacgrid}$ 및 틈새 농도 확률 $N_{intgrid}$ 를 식 (13)과 (14)로 정의한다.

$$N_{vacgrid} = \sum V(x_i, y_i, z_i) / VOL_{grid} \quad (13)$$

$$N_{intgrid} = \sum I(x_i, y_i, z_i) / VOL_{grid} \quad (14)$$

여기서, $\sum V(x_i, y_i, z_i)$ 및 $\sum I(x_i, y_i, z_i)$ 는 확장된 체적(VOL_{grid}) 속의 각 VOL_{unit} 체적 속의 틈새 및 결공 수의 합을 의미한다.

2) 충돌간의 비행 거리에 의해 만들어진 공간 체적 $VOL_{collision}$ 속의 충돌 여부를 확인하기 위한 결공 존재 농도 $N_{vaccollision}$ 과 존재하는 틈새 농도 $N_{intcollision}$ 은 식 (15)와 (16)에 의해 결정할 수 있다.

$$N_{vaccollision} = N_{vacgrid} \cdot P_{vol} \quad (15)$$

$$N_{intcollision} = N_{intgrid} \cdot P_{vol} \quad (16)$$

여기서, 체적 확률 P_{vol} 은 식 (17)로 결정된다.

$$P_{vol} = VOL_{collision} / VOL_{grid} \quad (17)$$

3) 이상적인 실리콘 격자 구조를 이용한 충돌간의 비행 거리이므로 이 비행 궤적 상에는 결공은 존재하지 않게 된다. 따라서, 이 비행 거리 궤적 내에 틈새가 존재하면 충돌을 해야 하므로 충돌 여부를 다음과 같은 난수 조건식 (18)로 결정한다.

$$Rn < P_{intcollision} \quad (18)$$

여기서, 충돌간의 한 궤적에서 틈새가 존재할 확률 $P_{intcollision}$ 은 식 (19)로 표현할 수 있다.

$$P_{intcollision} = N_{intcollision} / N_{sat} \quad (19)$$

조건식 (18)을 만족하는 경우, 틈새의 위치는 이 궤적 상에 존재한다고 가정하고 충돌 변수와 충돌 위치, 충돌 방위각을 난수(Rn)를 발생시켜 결정한다. 단, 틈새가 재결합 반경 내에 존재해서는 안되므로 이를 고려하여 산란간 길이는 식 (21)과 같이 결정하였다. 여기서, P_{max} 는 최대 충돌 변수(maximum impact parameter)이다.

$$\text{충돌 변수} : P = P_{max} \cdot Rn^{0.5} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{틈새와의 충돌 거리} : L_s = & (L_{ideal} - R_{cap}) \\ & \cdot Rn + R_{cap} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\text{충돌 방위각} : \phi_i = 2\pi \cdot Rn \quad (22)$$

4) 조건식 (18)을 만족하지 않는 경우에는 이 충돌 궤적 상에는 틈새가 존재하지 않는 경우가 되므로 이상적인 격자 구조에서의 충돌 파트너인 실리콘의 위치가 결공인지에 대한 여부를 결공 확률 $P_{vaccollision}$ 을 이용한 다음 조건식 (23)에 의해 결정할 수 있다.

$$Rn < P_{vaccollision} \quad (23)$$

여기서, 이번 충돌에서 결공일 확률 $P_{vaccollision}$ 은 식 (24)로 표현할 수 있다.

$$P_{vaccollision} = N_{vaccollision} / N_{si} \quad (24)$$

조건식 (23)를 만족하지 않는 경우, 이 실리콘은 결공 위치가 아니므로 충돌에 의한 진행 방향 변경을 계산한다.

5) 조건식 (23)를 만족하는 경우에는 이 실리콘 격자 위치가 결공 위치가 되므로 진행 방향을 바꾸지 않고

다시 바로 위에서 언급한 1)번에서 4)번까지의 과정을 반복한다.

5. 재결합 반경에 의한 점결합 포화 준위 농도 이상의 농도 준위를 완전 비정질층으로 정의하고 이러한 비정질 영역 및 비정질 층이 이온 및 반동 실리콘 케적에 미치는 영향을 고려한다.

1) 점결합 포화 준위 농도는 재결합 반경 R_{cap} 를 이용한 관계식 (12)에 의해 결정되므로 점결합 포화 준위 이상의 농도 준위에서의 비정질층은 결공 및 틈새와의 충돌을 구별할 수 없는 상태(원래의 실리콘 격자 구조를 모두 상실한 상태)가 되므로 이때의 충돌에 의해 움직이게 되는 모든 원자는 결공(vacancy)으로 정의하고, 정지한 원자는 틈새가 되는 것으로 정의 하였다. 이때 산란되어 정지한 원자가 비정질층을 넘어 산란되어 들어가는 경우에는 틈새로 정의하여 재결합을 고려하였고, 비정질층의 결공 및 틈새 모두 포화 준위 농도 이상에서는 재결합 여부를 고려하지 않고, 단순히 증가 시킴으로써 실리콘 영역이 비정질화된 때의 포화 준위 농도 이상은 고려되지 않도록 하였다.

2) 비정질 영역의 충돌 과정은 임의 산란을 가정한 비정질 물질에서의 시뮬레이션 모델인 TRIM 모델을 3차원으로 확장한 이전 모델^[8-12]을 사용하여 충돌 케적간 산란을 결정하였다.

6. 이온 주입된 이온은 틈새(substitutional-interstitial)로 분류된다. 따라서, 이온은 결공 분포를 감소시키게 되며, 실리콘의 포화 준위 농도 이상의 틈새 농도 분포를 형성시키게 된다. 이온 주입된 이온(틈새)의 영향으로 인해 결공은 더욱 감소하게 되고, 틈새 분포는 더 증가하게 된다. 시뮬레이션 결과가 직선의 포화 준위 농도를 나타낼 수 없는 이유이다.

따라서, 위의 1., 2., 3., 4., 5., 6. 절에서 묘사한 과정들에 대한 모델링을 통해 역동적으로 변하는 실리콘의 손상 구조를 묘사할 수 있으며, 이러한 격자 손상에 기인한 이온 및 반동 실리콘 케적에의 영향으로 인한 단결정 실리콘에서의 움직이는 원자들의 디채널링 및 채널링, 리채널링 과정을 일관적이며 역동적으로 시뮬레이션할 수가 있었다. 따라서, 제안한 모델을 통해 비정질층이 마스크 구조를 벗어나 3차원적으로 어떻게 형성되는 가에 대한 답을 제공받을 수 있게 되었다. 이러한 모델링을 통해 시뮬레이션된 B 및 BF_2 이온 분포는 도즈 및 높은 도즈 범위에서도 이온 분포에 대한 1차원 SIMS 측정치^[3-4, 13-15]와 잘 일치함을 확

인하였다.

III. BF_2 분자 이온 주입 모델링

BF_2 분자 이온 주입인 경우, 이들 B-F 간의 결합 에너지는 10eV 정도^[6]로 알려져 있는데, 이는 결합 에너지의 수천 배에 달하는 이온 주입 에너지를 고려하면 손쉽게 원자 핵간의 충돌에 의해 세 원자의 결합이 깨어지게 된다^[4,6]. 한 개의 B 및 두 개의 F 이온으로 분해되면, F 이온 케적이 만들게 되는 점결합에 의해 B 이온 주입 시보다 더 많은 누적 결함을 생성시키게 된다. 또한, 이러한 누적 점결합은 B 이온 분포를 더욱 실리콘 표면 쪽으로 치우치게 하므로 미세 접합 구조를 형성시키기 위한 중요한 분자 이온 주입 원(implanted molecular source)이 되고 있다. 그러나, F 이온이 전기적 특성에 영향을 끼치게 되므로 B 이온 농도 분포 만큼이나 F 이온 농도 분포 예측 또한 중요한 소자 특성 변수가 되고 있다. 따라서, B 및 F 불순물 농도 분포를 예측하기 위하여 다음과 같은 가정^[4,6]을 도입하였다.

1. BF_2 는 이온 주입되어 첫 충돌에서 결합이 깨어진다. 따라서, 이온 주입되는 하나의 BF_2 분자에 대해 독립된 한 개의 B 이온 주입과 두 개의 독립된 F 이온 주입으로 각각 시뮬레이션을 수행한다. 이때 누적되는 점결합 분포는 위에서 언급한 완전 역동 손상 모델을 적용하여 B 및 F 이온 케적에 반영한다.

2. BF_2 가 입사되는 초기 에너지가 E_0 라면 B 및 F 이온의 초기 에너지 E_B 및 E_F 는 BF_2 분자의 구성 질량 비로 결정할 수 있다. 여기서, M_B 는 B 이온의 원자 질량(amU)이며, M_F 는 F 이온의 원자 질량(amU)이다.

$$E_B = [(M_B / (M_B + 2 \cdot M_F))] \cdot E_0 \quad (25)$$

$$E_F = [(M_F / (M_B + 2 \cdot M_F))] \cdot E_0 \quad (26)$$

3. 이온 주입된 분자 BF_2 의 각 이온은 틈새(substitutional-interstitial)로 분류된다. 따라서, B 및 F 이온은 결공 분포를 감소시키게 되며, 실리콘의 포화 준위 농도 이상의 틈새 농도 분포를 형성시킨다.

4. B 이온 및 두 개의 F 이온 케적을 추적하고 또한 반동 실리콘 케적도 추적하게 되므로 보다 효율적인 수행 시간 보장을 위해 B의 초기 입사 수에 대한 가중치를 1로 보아 F 이온의 한 개에 해당하는 입사

수에 대한 가중치를 2로 정의한다. 이는 BF_2 의 초기 시뮬레이션 입자 수가 N개라면, B 이온은 N개, F 이온은 2N 개로 시뮬레이션해야 되지만 F의 가중치를 2로 정의한 경우에는 N개만 시뮬레이션할 수 있도록 적용하였다.

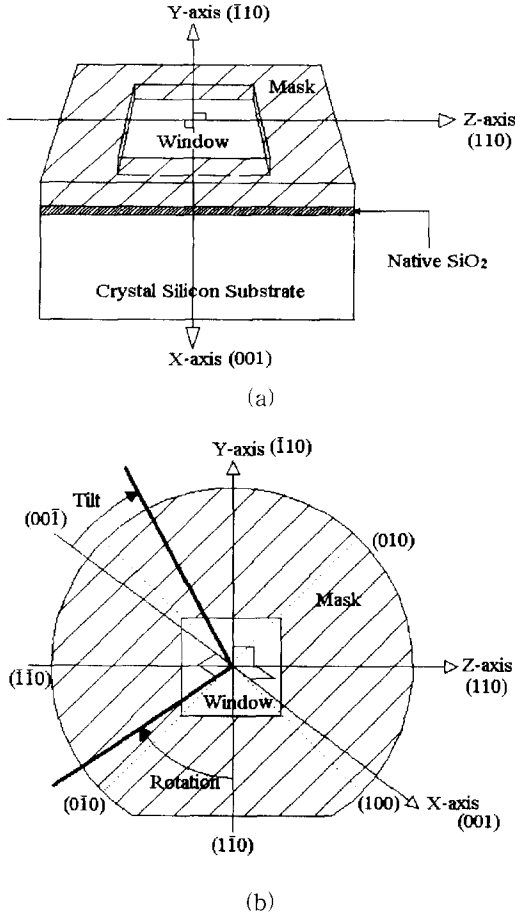


그림 2. 3차원 시뮬레이션 구조와 경사각 및 회전각의 정의

(a) 3차원 시뮬레이션 구조 (b) <100> Si 웨이퍼의 경사각 및 회전각의 정의

Fig. 2. 3D simulation structure and definitions of tilt and rotation angles.

(a) 3D simulation structure (b) Definitions of tilt and rotation angles on <100>Si Wafer.

V. 시뮬레이션 공정 조건 및 결과

그림 2(a)에서와 같은 이온 주입 시뮬레이션 영역(이하 공구조(hole structure))을 $100 \times 100 \times 100$ 개의 3차원 단위 체적(정육면체) 그리드(unit volume grid)의

메쉬(mesh)를 생성하고, 각 체적 그리드 길이는 시뮬레이션에 따라 50 및 100 Å으로 설정하였다. 시뮬레이션 영역에 따라 그리드 간격을 적절히 조절할 수 있는데, 현재 시뮬레이션 결과에 의하면 50 및 100Å 단위 그리드 간격은 별 차이를 나타내지 않았다. 앞으로 그리드 간격에 따른 모델의 타당성 검증이 요구되며, 분석하고자 하는 시뮬레이션 영역이 넓어지는 경우에 메쉬를 비등간격으로 설정할 필요가 있다. 그림 2(b)에서는 경사각(tilt) 및 회전각(rotation)을 정의하였다.

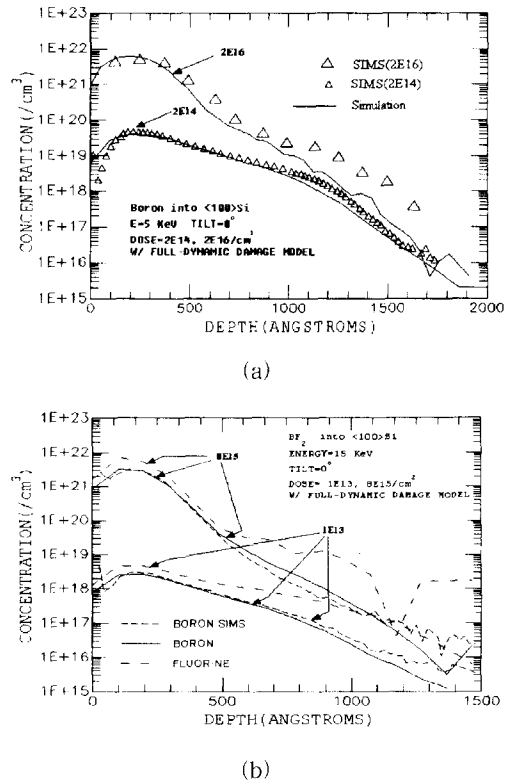
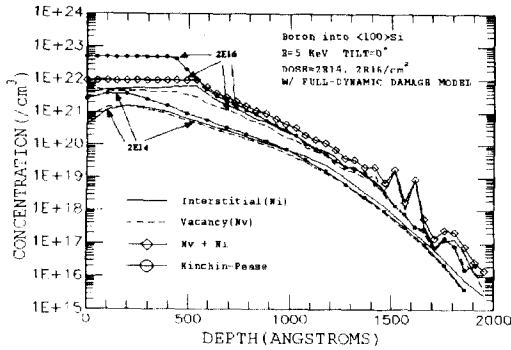


그림 3. B 및 BF_2 이온 주입 도즈에 따른 1차원 이온 주입 불순물 농도 분포

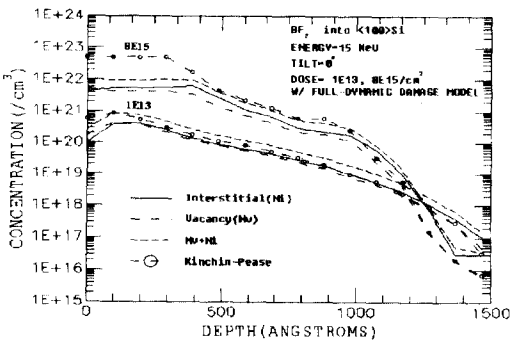
(a) B 이온 주입시의 1차원 이온 주입 불순물 농도 분포: 에너지 5 KeV, 경사각 0° , 회전각 0° , 도즈 $1E13, 8E15/cm^2$ (b) BF_2 이온 주입시의 1차원 이온 주입 불순물 농도 분포: 에너지 15KeV, 경사각 0° , 회전각 0° , 도즈 $1E13, 8E15/cm^2$

Fig. 3. Simulation results of the 1D B- and BF_2 -implanted range profiles at low-dose case and high-dose case: (a) B-implanted range profiles at energy 5 keV, tilt 0° , rotation 0° , dose $2E14, 2E16/cm^2$, (b) BF_2 -implanted range profiles at energy 15 keV, tilt 0° , rotations 0° , dose $1E13, 8E15/cm^2$.

3차원 좌표 위치에 따른 각 그리드에 결공 및 틈새, 그리고 이온의 농도 분포를 각각 저장하였다. 이들 각각의 분포에 대한 2차원 결과는 각 3차원 투영면으로의 2차원 투영 농도로 표현하였다. 마스크는 이온의 침투를 막을 만큼 충분히 두꺼운 것으로 가정하였고 수직인 모서리 면을 갖는다고 가정하였다. 논문에서의 SIMS 측정치는 문헌 [3-4], [15-16]에서 발췌하였다.



(a)



(b)

그림 4. B 및 BF₂ 이온 주입 도즈에 따른 1차원 점결함 농도 분포

(a) B 이온 주입시 발생한 1차원 점결함 농도 분포: 에너지 5 KeV, 경사각 0°, 회전각 0°, 2E14, 2E16/cm² (b) BF₂ 이온 주입시 발생한 1차원 점결함 농도 분포: 에너지 15KeV, 경사각 0°, 회전각 0°, 도즈 1E13, 8E15/cm².

Fig. 4. Simulation results of the 1D B- and BF₂-implanted point defect range profiles at low- and high-dose implants: (a) B-implanted point defect range profiles at energy 5 KeV, tilt 0°, rotation 0°, dose 2E14, 2E16/cm², (b) BF₂-implanted point defect range profiles at energy 15 KeV, tilt 0°, rotation 0°, dose 1E13, 8E15/cm².

본 논문에서 제안한 도즈 의존성 모델링에 대한 타당성을 입증하기 위하여 그림 3에 낮은 도즈와 높은 도즈에서의 B 및 BF₂ 시뮬레이션 결과를 1차원 실험치인 SIMS 측정값과 비교하여 나타내었으며, 같은 공정 조건에서 계산한 완전 역동 손상 모델과 Kinchin-Pease 모델^[12]을 이용하여 계산한 점결함 분포 결과를 그림 4에 나타내었다.

그림 4에서는 B 이온 주입시 에너지는 5 keV이며, 도즈는 2E14/cm² 와 2E16/cm²을 사용하고 BF₂ 이온 주입시 에너지는 15 keV이며, 도즈는 1E13/cm² 와 8E15/cm²을 사용하였다. 웨이퍼의 경사각(tilt angle) 및 회전각(rotation angle)은 모두 0°이며, 마스크의 정사각 오픈 윈도우 크기는 0.1×0.1 μm² 로 설정하였다.

그림 4에서 B 및 BF₂ 이온 주입인 경우 모두 Kinchin-Pease 식을 이용한 경우의 점결함 분포에 비해 표면 쪽에서 낮게 나타나고 있으며, 채널링된 이온 분포의 꼬리(tail) 부분에서는 비슷한 결과를 나타내고 있는데, 이는 Kinchin-Pease 식이 단결정 구조 및 셸프 어닐링 효과를 고려하지 않은 결과로 해석된다. 또한, B 및 BF₂ 이온 주입인 경우에 설정한 두 가지 도즈에 대해서 비교적 정확한 1차원 이온 주입 분포를 얻을 수 있었다. 그러나, 점결함 분포에 있어서는 결공 분포 및 틈새 분포가 다르게 나타나는 결과를 얻었다.

이는 주입된 이온이 실리콘 벌크 속으로 진행하려는 운동량의 방향성으로 인해 이온 진행 방향으로의 실리콘 반동에 의한 분포로 해석되며 1차원 분포에서 최대 이온 주입 농도 이전의 위치(대략 0.8×R_p)에서 최대 점결함 농도가 형성되고, 이 지점을 중심으로 실리콘 표면 쪽의 영역에서는 틈새에 비해 더 많은 결공 분포가 형성되며, 이 지점을 지나 실리콘 벌크 방향으로서는 틈새 분포가 더 많이 형성되고 있음을 확인할 수 있었다^[17]. 특히, B 이온 주입인 경우에는 결공과 틈새 분포가 같다고 발표^[3]되어 알려져 있으나 이와는 다른 결과를 얻었다.

이러한 결과를 2차원적으로 확인하기 위하여 B 15 keV, 도즈 2E14/cm²인 경우에 웨이퍼 경사각 0° 및 15° 주입시의 이온 분포 차이를 그림 5에 나타내었고, 경사각에 의한 점결함 분포의 차이점을 그림 6에 각각 나타내었다. 오픈 영역은 1000×1000 Å²으로 설정하고 마스크 층의 두께는 500Å로 설정하였다.

그림 5에서는 이들의 결과를 3차원 각 면에 투영하

여 얻은 2차원 투영 이온 농도 분포로 나타내었다. 수직 및 경사 15° 입사 시의 이온 농도 분포를 보면 경사 이온 주입시 마스크 두께에 의한 shadow 효과로 인해 이온 분포가 경사 방향으로 비대칭 구조를 이루는 것을 알 수가 있으며, 마스크 두께에 의해 가려지는 부분(+Y 방향)에서는 농도가 감소하고 그 반대 방향(-Y 방향)으로는 이온이 더 치우쳐 나타나고 있는 경사각 의존성을 잘 나타내고 있다.

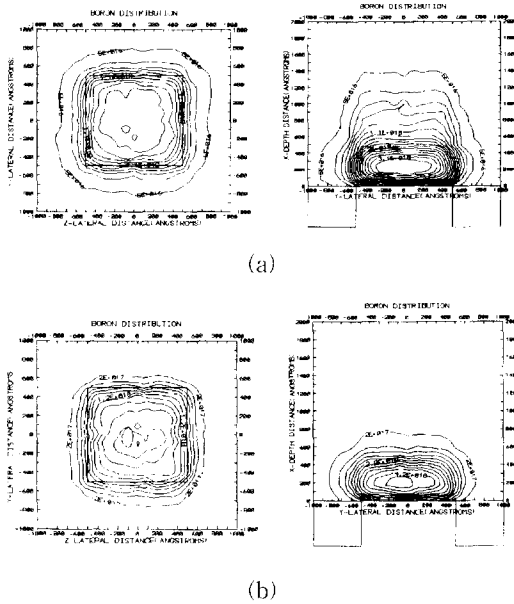


그림 5. B 이온 주입 경사각에 따른 2차원 이온 주입 불순물 농도 분포 비교:

(a) B 이온 주입시의 2차원 불순물 농도 분포: 에너지 5 keV, 도즈 2E14/cm², 경사각 0°, 회전각 0°, (b) B 이온 주입시의 2차원 불순물 농도 분포: 에너지 5 keV, 도즈 2E14/cm², 경사각 15°, 회전각 0°

Fig. 5. Comparison of the 2D B-implanted range profile of tilt 0° case with those of the tilt 10° case: energy 5 keV, dose 2E14/cm², (a) tilt 0°, rotation 0°, (b) tilt 15°, rotation 0°.

그림 6에서는 위에서 언급한 점결함 분포에 대한 1차원 결과 [그림 4.]가 깊이에 따른 측면 분포로는 어떻게 형성되어 나타나고 있는가를 보여주고 있다. 그림 4.에서의 결공 분포와 틱새 분포가 다른 결과를 2차원적으로 경사 0° 및 15° 주입시의 차이를 동시에 나타내었다.

실리콘 웨이퍼를 수직으로 바라본 방향에서의 양측

면 점결함 분포도에서는 결공과 틱새 분포가 거의 동일하게 나타나고 있고 깊이에 따른 측면 분포도에서는 실리콘 벌크 쪽에서는 틱새가 실리콘 표면 쪽에서는 결공 농도 분포가 더 많이 형성되고 있음을 2차원적으로 나타내고 있다. 이러한 결과는 주입된 방향으로의 이온 운동량을 갖는 이온에 의해 반동된 실리콘은 초기 결공 위치에서 벌크 쪽으로 반동되어 산란하게 됨을 의미한다. 실리콘 표면에 수직인 방향에서 보았을 때 나타난 양 측면 분포를 보면 결공과 틱새 분포가 거의 같게 나타나고 있는 데, 이는 격자 구조에 기인한 반동 원자의 측방향(이온 주입 방향) 채널링(axial channeling) 현상으로 인해 측면으로 산란되기 보다는 실리콘 벌크 방향으로의 산란이 더 우세함을 나타내고 있는 것으로 분석된다.

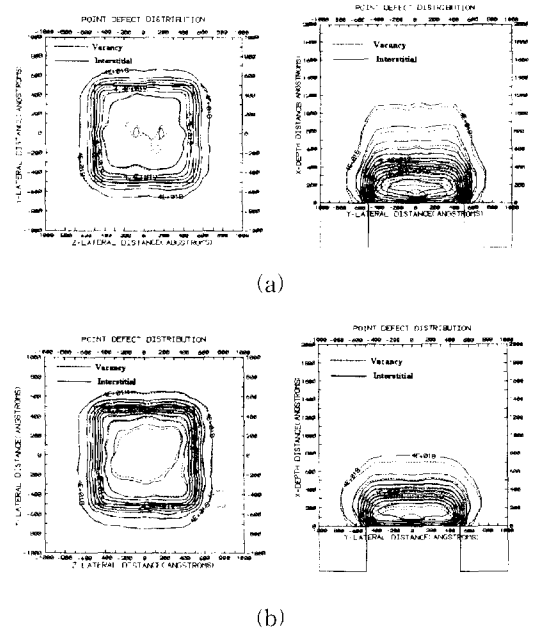
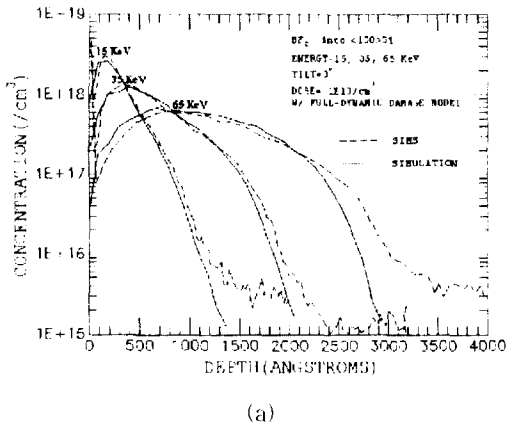


그림 6. B 이온 주입 경사각에 따른 2차원 점결함 농도 분포 비교: 에너지 5 keV, 도즈 2E14/cm², (a)경사각 0°, (b) 경사각 15°, 회전각은 모두 0° (a) B 이온 주입시 발생한 2차원 점결함 분포: 에너지 5 keV, 도즈 2E14/cm², 경사각 0°, 회전각 0°. (b) B 이온 주입시 발생한 2차원 점결함 분포: 에너지 5 keV, 도즈 2E14/cm², 경사각 15°, 회전각 0°.

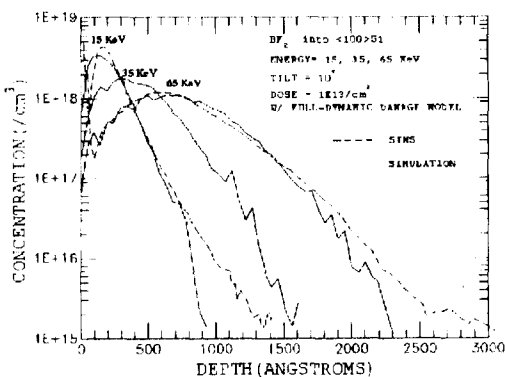
Fig. 6. Comparison of the 2D point defect range profile of tilt 0° case with those of the tilt 10° case during Boron implantation: energy 5 keV, dose 2E14/cm², (a) tilt 0°, rotation 0°, (b) tilt 15°, rotation 0°.

그림 7에서는 B 및 BF₂ 이온 주입시의 낮은 도즈 1E13/cm²에서 에너지에 따른 경사각 의존성을 SIMS 측정치와 비교하여 나타내었다. 에너지에 따른 경사각 의존성을 본 모델이 잘 예측하고 있음을 나타내고 있다.

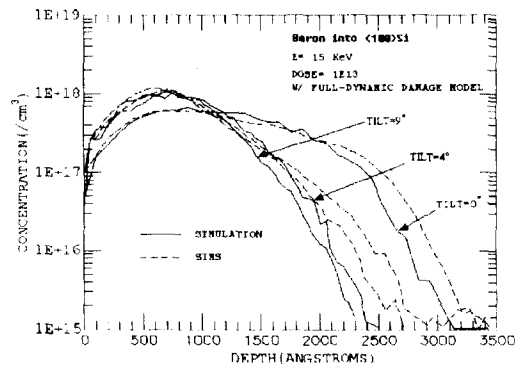
그림 8에서는 셀프 어닐링 효과에 의해서 도즈가 증가하더라도 더 이상 점결함 분포는 증가하지 않는 포화 준위 농도(Nv+Ni)는 실리콘 밀도의 20%에 해당하는 1E22/cm³가 타당하며, 이러한 농도 영역을 비정질화된 영역으로 정의하는 것이 타당함을 나타내었다. 이는 재결합 반경을 실리콘 원자간 근접 거리(실리콘 격자 상수×0.54)로 가정한 경우, 이 반경 내의 체적 속에는 결공 및 틈새 입자가 한 개 존재할 때의 농도 값이 된다. 포화 준위 농도가 수평하게 나타나고 있는 직선 영역(saturation level)이 계산된 깊이 방향으로의 1차원 비정질 영역을 나타낸다. 그림 8(a)에서의 공정 조건은 BF₂ 이온 주입, 도즈 8E15/cm², 경사각은 수직일 때, 에너지 15, 35, 65 keV로 변화시켰을 때 계산된 1차원 비정질층의 두께는 실리콘 표면으로부터 각각 400, 850, 1500 Å으로 나타났다.



(a)



(b)



(c)

그림 7. B 및 BF₂ 이온 주입 경사각에 따른 1차원 농도 분포에 대한 시뮬레이션 결과.

(a) BF₂ 이온 주입: 에너지 15, 35, 65 KeV, 도즈 1E13/cm², 경사각 0°, 회전각 0°에서의 시뮬레이션 결과. (b) BF₂ 이온 주입: 에너지 15, 35, 65 KeV, 도즈 1E13/cm², 경사각 10°, 회전각 0°에서의 시뮬레이션 결과. (c) B 이온 주입: 에너지 15 KeV, 도즈 1E13/cm², 회전각 0°, 경사각 0°, 4°, 9°에서의 시뮬레이션 결과.

Fig. 7. Simulation results of the 1D tilt-dependent B- and BF₂-implanted range profiles.

(a) Simulation results of the BF₂-implanted range profiles at varied energy 15, 35, 65 keV, dose 1E13/cm², tilt 0°, rotation 0°, (b) Simulation results of the BF₂-implanted range profiles at dose 1E13/cm², tilt 10°, rotation 0°, and each energy of 15, 35, 65 keV, (c) Simulation results of the B-implanted range profiles at energy 15 keV, dose 1E13/cm², rotation 0°, and each tilt angle of 0°, 4°, 9°.

그림 8(b)에서는 B 이온 주입시 에너지는 15keV, 도즈 1E13, 5E14, 8E15/cm²이며, 경사각은 0° 일 때의 공정 조건에서의 도즈 의존성과 함께 결함 준위 (defect level: Nv+Ni)를 함께 나타내었다. 최대 점결함 농도(saturation level)를 기준으로 각 도즈 1E13, 5E14, 8E15/cm² 일 때의 비정질화율(각 도즈에서의 최대 점결함 농도 대 점결함 포화 준위의 비)는 각각 100%, 60%, 1% 정도를 나타냈다. 도즈 8E15/cm²에서의 비정질층의 두께는 1350 Å으로 예측되었다.

그림 9에서는 본 논문에서 제안한 모델링을 통해 얻은 3차원 결과를 나타내었다. 3차원 결과의 통계적 잡음 영역을 최소화시키기 위해 1,000,000개의 시뮬레이션 입자를 사용하였다. 1/4 체적을 식각한 구조, 1/2 체적을 식각한 후 정면으로 돌려 본 단면 표면에서의

이온 농도 분포를 함께 나타내었다.

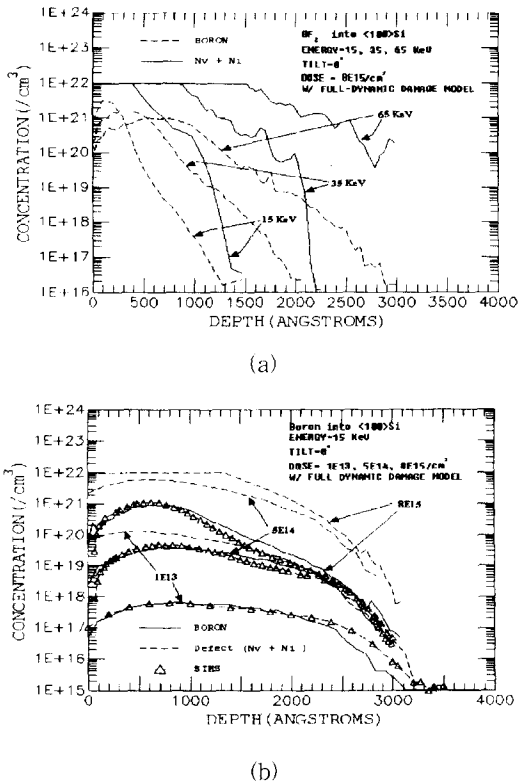


그림 8. B 및 BF₂ 이온 주입 도즈 및 에너지에 따른 1차원 비정질층 크기에 대한 시뮬레이션 결과. 여기서, 점결합 포화 준위 농도 (Nv+Ni)가 수평한 선으로 나타나는 것이 형성된 비정질층의 두께가 된다.

(a) BF₂ 이온 주입: 에너지 15, 35, 65 KeV, 도즈 8E15/cm², 경사각 0°, 회전각 0°에서의 시뮬레이션 결과. (b) Boron 이온 주입: 에너지 15 KeV, 도즈 1E13, 5E14, 8E15/cm², 경사각 0°, 회전각 0°에서의 시뮬레이션 결과

Fig. 8. Simulation results of the 1D thickness of the amorphous layer formed during B and BF₂ implantation at different energies and doses, where the horizontal line for the saturation level of the point defect (Nv+Ni) presents the thickness of the amorphous layer.

(a) Simulation results of the BF₂ implantation at dose 8E15/cm², tilt 0°, rotation 0°, and each energy of 15, 35, 65 keV. (b) Simulation results of the B implantation at energy 15 keV, tilt 0°, rotation 0°, and each dose of 1E13, 5E14, 8E15/cm².

가장 파란색은 저 농도(1E14/cm²)를 가장 빨간색은

고 농도(1E23/cm²)를 나타낸다. 웨이퍼의 백그라운드 농도(background concentration)는 표시하지 않았다. 컴퓨터 수행 시간은 PentiumPro PC 200 MHz에서 60시간이 걸렸다. 현재의 3차원 몬테 카를로 시뮬레이터가 실공정에 적용되기 위해서는 통계적 잡음 영역을 최소화하고, 현실적인 수행시간을 보장하기 위한 trajectory split method^[4, 16]를 적용 확장될 필요가 있다.

IV. 결론

효율적이고 정확한 물리적 토대의 일관성있는 이온 주입 모델링을 위하여 이온 주입된 이온의 궤적 및 반동된 실리콘 원자의 궤적을 모두 추적하고 이때 발생한 결함 분포를 이용한 확률을 도입함으로써 이온 및 반동 실리콘 원자 궤적에서의 격자 손상 효과에 의한 채널링, 디채널링, 리채널링 과정을 역동적으로 묘사한 3차원 완전 역동 손상 모델을 제안하였다. B 및 BF₂ 이온 주입인 경우 낮은 도즈 및 높은 도즈에서도 본 논문에서 제안한 모델이 성공적으로 SIMS 측정치와 근접한 결과를 나타냄을 확인하였다. 점결합 분포에 있어서는 최대 이온 주입 농도 이전(대략 0.8×지점)에서 최대 점결합 농도가 형성되고, 이온 진행 방향으로의 실리콘 반동으로 인한 현상인 점결합 최대 농도 이전에는 결공 분포가 틱새에 비해 많이 형성되고, 이 지점을 지나 실리콘 깊이 방향으로 틱새형 원자 분포가 더 많이 형성됨을 확인하였다.

본 연구의 결과는 원자 및 분자 이온 주입시의 불순물 분포 예측을 가능하게 하며, 동시에 점결합 분포에 대한 정보를 이온 주입 후의 급은 열처리공정(RTA 공정)에 제공할 수 있으므로 해서 불순물 확산 메커니즘 연구 및 이온 주입 후의 열확산 공정에서 발생하게 되는 이상 확산 현상인 TED 확산 재분포와 같은 현상을 물리적으로 이해, 규명하기 위한 유용한 정보를 제공할 수 있으리라 기대된다. 제안된 점결합 모델링을 통해 ULSI CMOS 공정 기술 및 제조를 위한 3차원 초미세 접합 형성 구조 및 비정질층의 형성 구조 예측과 함께 이온 및 점결합 분포를 동시에 예측 이해할 수 있으리라 기대된다. 따라서, 초미세 소자 개발을 위한 연속 공정 시뮬레이션에 본 모델에서의 이온 및 점결합 분포를 제공하고 이와 함께 3차원 공정 및 소자 시뮬레이션이 이루어질 수 있다면 ULSI CMOS 소자

개발 비용 및 시간을 크게 단축 시킬 수 있으리라 기대된다.

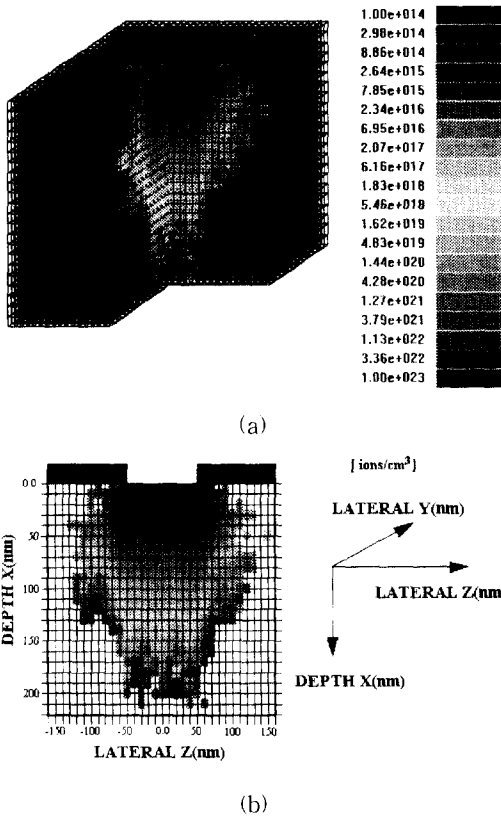


그림 9. 완전 역동 손상 모델을 적용한 3차원 B 이온 주입 농도 분포: 에너지 5 keV, 도즈 $2E16/cm^2$, 경사각 0° , 회전각 0° . 그림 9(a)에서 이온 주입 영역 표면에 그려진 녹색 직선들은 이온 주입 영역의 중심에서 1/4 체적을 자른 후의 이온 주입 영역의 마스크 모서리를 나타낸다. 정사각형 이온 주입 영역의 크기는 $1000 \times 1000 \text{ \AA}^2$ 이다.

Fig. 9. Simulation results of the 3D Boron concentration profiles at energy 5 keV, dose $2E16/cm^2$, tilt 0° , rotation 0° applied with the full-dynamic damage model, where the green lines on the implanted surface in the Fig. 9(a) presented the edge edges of the 1/4-sected part of the entire volume from the center of the implanted perfect-square region which is $1000 \times 1000 \text{ \AA}^2$. (a) 1/4-section view of the 3D Boron concentration profile (b) 1/2-section view of the 3D Boron concentration profile

참 고 문 헌

[1] G. Hobler, "Net Point Defect Concen-

trations After Ion Implantation in Silicon," the Proceedings of the 4th International Symp. on Process Physics and Modeling in Semiconductor Technology, pp. 509-521, 1996.

[2] M. Posselt, "3D modeling of ion implantation into crystalline silicon: influence of damage accumulation on dopant profiles," Nucl. Inst. and Meth., B96, pp. 163-167, 1995.

[3] K.M. Klein, C. Park, and A.F. Tasch, "Modeling of cumulative damage effects on ion implantation profiles", Nucl. Inst. and Meth., B59/60, pp. 60-64, 1991.

[4] S.-H. Yang et. al, "An Accurate Monte Carlo Binary Collision Model for BF_2 Implants into (100)Single-Crystal Silicon," the Proceedings of the 4th International Symp. on Process Physics and Modeling in Semiconductor Technology, pp. 481-494, 1996.

[5] ECS96(ElectroChemical Society 96, L.A., USA) 국제회의장에서 S.-H. Yang 박사와 개인적 의견 교환, 5월, 1996

[6] M. Posselt and B. Schmidt, C.S. Murthy, T. Feudel, "Modeling of Damage Accumulation during Ion Implantation into Single-Crystalline Silicon," the Proceedings of the 4th International Symp. on Process Physics and Modeling in Semiconductor Technology, pp. 453-467, 1996.

[7] M. Posselt, "Dynamic simulation of damage accumulation during ion implantation of BF_2 molecular ions into crystalline silicon," Nucl. Inst. and Meth., B102, 1995.

[8] 손명식, 이준하, 송영진, 황호정, "<100>방향 실리콘 단결정에서의 저 에너지 붕소 이온 주입 공정에 대한 3차원 몬테 카를로 시뮬레이션 및 마스크 효과," 전자공학회 논문지, 제32권 A편, 제8호, pp. 94-106, 1995

[9] M. Son, H. Park, H. Hwang, "Three-Dimensional Monte Carlo Simulation of Boron Implantation into <100>Single-Crystal Silicon Considering Mask Structure," the Proceedings of the 6th inter-

- national Conference on Simulation of Semiconductor Devices and Processes vol. 6, pp. 214-217, 1995.
- [10] Myung-Sik Son, Jun-Ha Lee, Ki-Ryang Byun, Ho-Jung Hwang, "Three-Dimensional Monte Carlo Simulation of Implanted Boron and Damage Distribution in Crystalline Silicon Considering Mask Structure," the Proceedings of the 4th International Symp. on Process Physics and Modeling in Semiconductor Technology, pp. 496-508, 1996.
- [11] M. Jaraiz et. al, Vacuum 44, 321(1991)
- [12] J. F. Ziegler et. al, The stopping and Range of Ions in Solids, vol. I, New York : Pergamon, 1985.
- [13] A.E. Michel et. al, "Channeling in low energy Boron ion implantation," Appl. Phys. Lett. 44(4), pp. 404-406, 1984.
- [14] Masami Hane et. al, "A Model for Boron Short Time Diffusion after Ion Implantation," IEEE IEDM '91 Tech. Dig., pp. 701-704, 1991.
- [15] S.H. Yang, D. Lim, S.J. Morris, A.F. Tasch, "Improved efficiency in Monte Carlo simulation of ion implanted profiles in single-crystal materials," Nucl. Inst. and Meth., B 102, pp. 242-246, 1995.
- [16] Walter Bohmayr et. al, "Trajectory Split Method for Monte Carlo Simulation of Ion Implantation," IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, vol. 8, no. 4, pp. 402-407, Nov.1995.
- [17] M. Servidori et. al, "Defect Distribution in Ion Implanted Silicon: Comparison between Monte Carlo Simulation and Triple X-Ray Measurements", Nucl. Inst. and Meth., B22, pp. 397-498, 1987.

저 자 소 개



孫明植(正會員)

1967년 7월 20일생. 1992년 2월 중앙대학교 전자공학과 졸업. 1995년 2월 중앙대 대학원 전자공학과 석사. 1995년 3월 ~ 현재 중앙대학교 전자공학과 박사과정. 관심분야는 반도체 소자 및 공정 물리, 이온 주입 모델링

및 시뮬레이션 등임.

黃好正(正會員) 第26卷 第7號 參照

현재 중앙대학교 전자공학과 교수.