

論文99-36D-3-4

초미세 접합형성을 위한 극 저 에너지 B, P 및 As 이온주입시 채널링 현상에 관한 연구

(A Study on the Channeling Effect of Ultra Low Energy B, P and As Ion Implant to Form Ultra-Shallow Junction of Semiconductor Device)

姜正遠*, 黃好正*

(J.W. Kang and H.J. Hwang)

요 약

본 논문에서는 반도체 소자 제조 기술의 발전을 위하여 극 저 에너지 붕소(B), 인(P), 및 비소(As) 이온 주입시 발생하는 채널링 현상이 초미세 접합깊이 형성에 미치는 영향에 관하여 개선된 MDRANGE 시뮬레이션 결과를 통하여 보여주고 있다. 본 연구에서 시뮬레이션된 5 keV 이하의 에너지에서조차도 이온 채널링 현상은 불순물의 농도 분포에 중요한 영향을 미치게 되는 것을 알 수 있었다. 붕소의 경우 500 eV 이상의 에너지에서, 인의 경우 2 keV 이상의 에너지에서, 그리고 비소의 경우 대략 4 keV 이상의 에너지에서 채널링 현상이 불순물 분포에 크게 영향을 미치는 것으로 예측되었다. 또한 1 keV 붕소, 2 keV 인, 그리고 5 keV 비소 이온 주입 에너지에서 경사도 7° 인 경우와 경사도 0° 인 경우의 2차원적인 농도분포를 통하여 채널링 현상이 측면 방향보다는 깊이 방향으로 대부분 발생하는 것을 볼 수 있었다.

Abstract

We have investigated the ultra-low energy B, P, and As ion implantation using upgraded MDRANGE code to study formation of nanometer junction depths. Even at the ultra-low energies simulated in this paper, it was revealed that ion channeling should be carefully considered. It was estimated that ion channelings have much effect on dopant profiles when B ion implant energies were more than 500 eV, P more than 2 keV and As approximately more than 4 keV. When we compared 2-dimensional dopant profiles of 1 keV B with that of tilted one, 2 keV P with tilt, and 5 keV As with tilt, we could find that most channeling cases occurred not lateral directions but depth directions.

1. 서 론

급속한 반도체 제조 기술의 발전으로 인하여 2012 년경에는 MOS 소자의 채널 깊이와 접합 깊이는 각각 50 nm와 20 nm 영역이 될 것으로 예상된다^[1].

이온 주입 기술을 사용하여 나노 구조(nanostructure) 반도체 소자를 형성하기 위해서는 더욱 정교한 극 저 에너지 이온 주입이 요구된다. 또한 급격한 소자의 크기 감소로 인하여 이온 주입 공정에서 발생하는 이온의 측면 산란(lateral straggle)은 중요한 문제로 대두되고 있다^[2]. 이러한 극 저 에너지 이온주입으로 형성된 나노미터 영역 반도체 접합에 대한 시뮬레이션은 반드시 원자 단위에서 계산되고 연구되어야 한다. 원

* 正會員, 中央大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Engineering, Chung-Ang Univ.)

接受日字:1998年11月19日, 수정완료일:1999年2月26日

자단위의 이온 주입 시뮬레이션을 위해서는 Monte Carlo 방법과 MD(molecular dynamics) 방법이 사용되고 있다. 응집물질(condensed matter) 내부와 표면에서 발생하는 현상들을 시뮬레이션하기 위해서는 MD 방법이 주로 사용되고 있다^[3-9]. 그러나 MD 시뮬레이션을 위해서는 계산량이 많기 때문에 주기적인 경계조건을 사용하여 적은 수의 원자로도 좀더 현실적인 고려가 가능하도록 하고 있다. 이러한 주기적인 경계 조건을 사용한 시뮬레이션은 불순물의 1차원적인 분포만을 얻을 수 밖에 없으므로 차세대 GSI 소자 개발을 위하여서는 극 저 에너지 이온 주입에 따른 불순물의 1차원적 및 3차원적인 분포를 예측해야만 한다. MD 방법을 사용한 이온 주입 시뮬레이션을 위하여 BCA(binary collision approximation) 방법에 사용하는 격자 생성 알고리즘을 적용하고 RIA(Recoil Ion Approximation) 방법을 사용하여 이온에 근접한 영역에 있는 원자들만을 대상으로 MD 계산을 수행하는 이온 주입 시뮬레이터인 MDRANGE^[10]가 K. Nordlund에 의해서 개발되었다. 본 연구에서는 반도체 공정에 알맞도록 개선된 MDRANGE^[11]를 사용하여 실리콘 반도체 소자 제조 공정에 사용되어지는 물질인 B, P 및 As에 대한 극 저 에너지 이온 주입 시뮬레이션이 수행되어지고 불순물 원소에 따라서 이온 채널링이 불순물의 분포에 큰 영향을 미치는 에너지 영역과 이에 따른 불순물 분포에 관하여 논의하고자 한다.

II. 본 연구에 사용된 시뮬레이터

MDRANGE는 1 eV/amu - 1 MeV/amu 에너지 영역에서 사용할 수 있으며 100 eV/amu - 100 keV/amu 에너지 영역에서 타당한 결과를 얻을 수 있는 시뮬레이터이다^[10]. 원자의 다음 위치와 속도를 계산하기 위하여 Smith-Harrison 알고리즘^[12]과 계산 속도 향상을 위하여 VTS(variable time step)을 사용하고 있다. 이온 주입 분포를 구하는 계산량을 줄이기 위하여 주입된 이온만을 추적하는 RIA 방법을 사용한다. DMol DFT(density functional theory) 패키지로부터 계산된 반발 전위를 사용하여 핵 저지력(nuclear stopping power)을 계산하고, 전자 저지력(electronic stopping power)은 Brandt-Kitagawa 이론^[13]에 기초한 Cai 등^[14]과 Beardmore 등^[15]의

파라미터를 사용한다. 그리고 원자간 비탄성 충돌(inelastic collision)로 인한 에너지 손실을 계산하기 위해서는 Firsov 모델^[16]을 사용하고 다음의 식(1)과 같다.

$$\bar{F}_{12} = (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)(8.06172 \times 10^{-2} Z^2) \left(\exp(-C) \sum_{m=0}^7 \left(\frac{C^m}{m!} \right) \right) \left(\frac{eV}{\text{\AA}} \right) \quad (1)$$

여기서 \bar{F}_{12} 는 반발력이고, Z 는 충돌하는 두 원자 번호이고, \vec{v}_1 은 실리콘의 속도이고, \vec{v}_2 는 이온의 속도이고, $C = 13.4646 Z^{1/12} (r_{12})^{1/4}$ 이다. r_{12} 는 실리콘과 이온 사이의 거리를 나타낸다.

그러나 MDRANGE는 이온이 주입 영역이 $5.43 \text{ \AA} \times 5.43 \text{ \AA}$ 으로 1차원적인 분포만을 얻을 수 있도록 되어 있다. 소자의 극소형화에 필수적으로 요구되는 극 저 에너지 이온 주입, 마스크 구조 효과 및 3차원적인 분포를 얻도록 개선된 MDRANGE는 이온 주입되는 마스크 영역을 인식하여 주입되는 이온의 개수를 조절하여 도즈에 따른 시뮬레이션이 가능하도록 하였다^[11]. 또한 WinNT 4.SP3 OS(operating system)을 가진 Alpha 21164 600 Mhz 컴퓨터에서 VC++R 5.0으로 실행할 경우 1 keV 붕소 1000개 이온 주입에 소요되는 CPU 사용시간은 150초로 PC에서 수 분 이내에 불순물의 분포를 계산할 수 있다.

III. 극 저 에너지 이온주입 시뮬레이션 결과 및 분석

그림 1은 에너지 500 eV 및 도즈 $3 \times 10^{14} / \text{cm}^2$ 의 붕소 이온주입에서 MDRANGE와 SIMS 측정 결과^[17] 및 250 eV 도즈 및 $1 \times 10^{15} / \text{cm}^2$ 의 붕소 이온 주입 MC 결과^[18]를 비교한 것이다. SIMS 측정 결과와 MDRANGE 결과는 피크 농도 및 깊이 방향 농도 분포에 대하여 잘 일치하는 것을 볼 수 있고 250 eV MC 결과와 MDRANGE결과도 정확하게 일치하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 본 논문에서는 극 저 에너지 붕소 이온 주입에 대하여 SIMS와 타 시뮬레이션과 일치하는 MDRANGE를 이용하여 붕소 인 및 비소에 관하여 논의한다.

본 논문에서 공정 조건이 $100 \text{ \AA} \times 100 \text{ \AA}$ 영역에 1000개의 이온이 주입되어 도즈가 $10^{15} / \text{cm}^2$ 인 경우에 한하여 시뮬레이션되었다. 극 저 에너지 이온

주입시 각 불순물의 채널링 현상이 발생하는 이온 분포에 영향을 미칠 수 있는 에너지 영역에 관하여 연구하기 위하여 이온 주입 방향이 <100>인 경우와 <100> 방향에 대하여 경사도 7°인 경우를 비교하여 연구하였다.

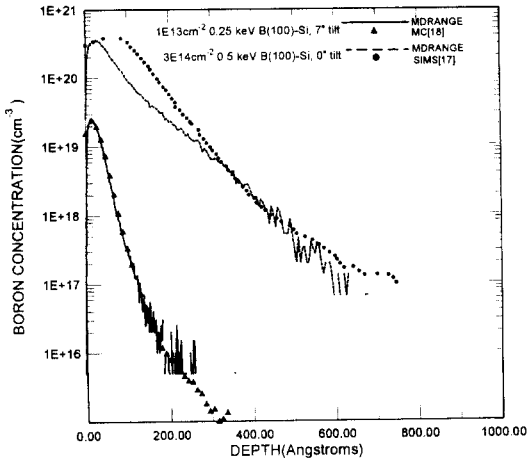


그림 1. $3 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 도즈 500 eV 붕소 이온 주입 SIMS 결과 [17] 및 $1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 도즈 250 eV 붕소 이온 주입 MC 결과 [18]와 MDRANGE 결과 비교

Fig. 1. Comparison with SIMS [17] and MDRANGE due to dose $3 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 500 eV boron ion implant and comparison with MC [18] and MDRANGE due to dose $1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 250 eV boron ion implant.

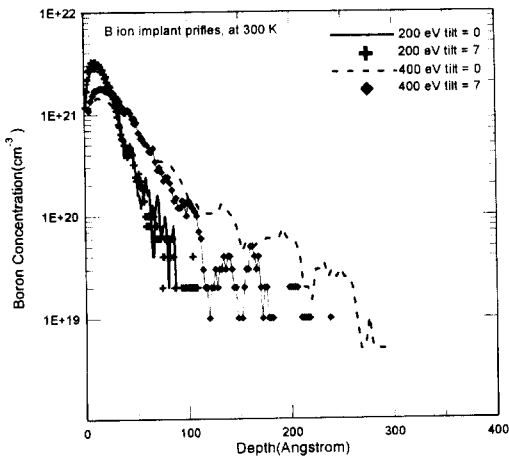


그림 2. 300K 에서, 200eV, 400 eV 에너지 붕소 이온 주입시 경사도 0° 및 7°일 경우의 계산된 1차원적인 불순물 분포

Fig. 2. Calculated dopant profiles due to tilt angle at 300 K, in the cases of 200 eV and 400 eV boron ion implant.

그림 2에서는 300 K에서 200 eV 및 400 eV 에너지 붕소 이온 주입시 경사도에 경사도 7°일 경우와 경사도 0°일 경우 1차원적인 분포의 차이를 보여주고 있다. 200 eV인 경우 경사도에 따른 농도 분포 차이가 나타나지 않는 것을 알 수 있고, 400 eV 경우 경사도에 따른 농도 분포의 차이가 약간 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 3에서는 500 eV, 800 eV 및 1 keV 에너지 붕소 이온 주입시 경사도 7°일 경우와 경사도 0°일 경우 1차원적인 농도 분포의 차이를 보여주고 있다. 그림 3 과 같이 500 eV 이상 에너지 이온 주입인 경우에는 경사도에 따른 깊이 방향 불순물 분포 차이가 많이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 차이는 500 eV 이상 에너지 붕소 이온 주입인 경우에는 채널링 현상이 많이 발생되었기 때문에 채널링 현상을 억제하기 위한 경사도 7°인 경우는 경사도 0°인 경우와 많은 차이를 보인다. 하지만 200 eV인 경우에는 붕소 이온의 채널링이 거의 발생하지 않거나 발생된 채널링 경우도 이온 분포에 미치는 영향이 미미하기 때문에 경사도에 따른 차이가 거의 나타나지 않는다. 위의 결과로 1 keV 이하의 극 저 에너지 붕소 이온 주입에서도 채널링에 대한 신중한 고려가 필요하다라는 것을 알 수 있다.

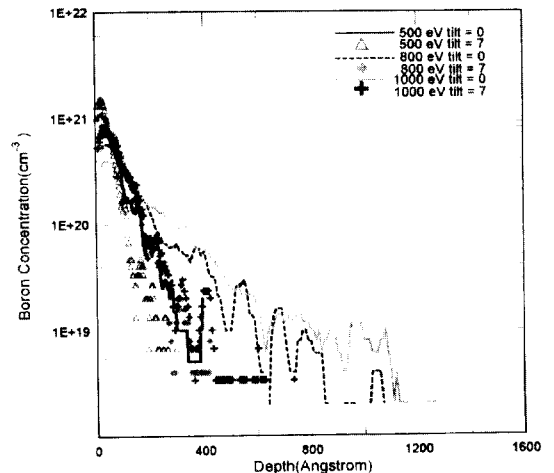


그림 3. 300K에서, 500 eV, 800 eV 및 1 keV 에너지 붕소 이온 주입시 경사도 0° 및 7°인 경우의 계산된 1차원적인 불순물 분포

Fig. 3. Calculated dopant profiles due to tilt angle at 300 K, in the cases of 500 eV, 800 eV and 1 keV boron ion implant.

그림 4에서부터 그림 6까지는 극 저 에너지 인(P)

이온주입에 대한 1차원적인 농도 분포이다. 그림 4와 5에서 인의 경우 1 keV 에너지 이하에서는 경사도에 따른 불순물 분포에 큰 차이를 보이지 않는 것을 볼 수 있다. 그러나, 2 keV 이상의 경우에는 경사도에 따라서 농도 분포에 큰 차이를 보이고 있다. 또한 그림 6에서도 5 keV 에너지 인 이온 주입에서 경사도 7° 일 경우는 경사도 0° 일 경우보다 이온 채널링 영역이 절반 이상 줄어든 것을 볼 수 있다.

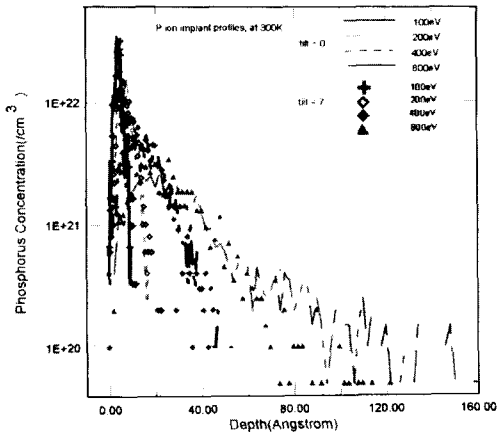


그림 4. 0.1 keV, 0.2 keV, 0.4 keV 및 0.8 keV 인(P) 이온 주입시 경사도 0° 및 7° 인 경우의 계산된 1차원적인 불순물의 분포

Fig. 4. Calculated dopant profiles due to tilt angle at 300 K, in the cases of 0.1 keV, 0.2 keV, 0.4 keV and 0.8 keV phosphorus ion implant.

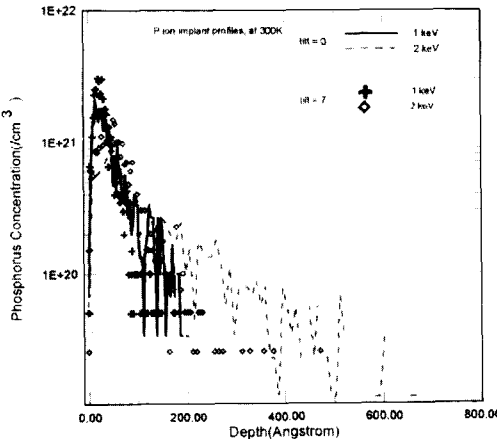


그림 5. 1 keV 및 2 keV 인(P) 이온 주입시 경사도 0° 및 7° 인 경우의 계산된 1차원적인 불순물의 분포

Fig. 5. Calculated dopant profiles due to tilt angle at 300 K, in the cases of 1 keV and 2 keV phosphorus ion implant.

경사도 0° 에서 2 keV 인 이온 주입 결과와 경사도 7° 에서 5 keV 인 이온 주입 결과가 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 극 저 에너지 인 이온 주입시 에너지 1 keV 이하에서 채널링이 발생하는 경우는 미미하여 발생한 채널링 경우도 인 분포에 영향을 거의 미치지 못하지만, 2 keV 이상의 에너지에서는 채널링 현상이 인 분포에 큰 영향을 미치므로 이에 대한 고려가 필요함을 알 수 있다.

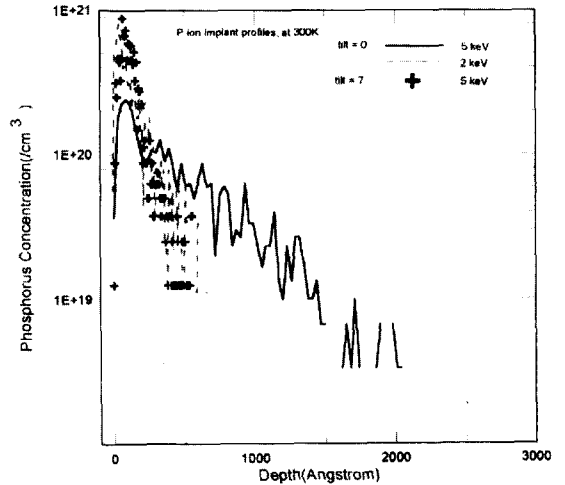


그림 6. 2 keV 및 5 keV 인(P) 이온 주입시 경사도 0° 및 7° 인 경우의 계산된 1차원적인 불순물의 분포

Fig. 6. Calculated dopant profiles due to tilt angle at 300 K, in the cases of 2 keV and 5 keV phosphorus ion implant.

그림 7은 0.5 keV와 1 keV 에너지 비소(As) 이온 주입 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 경사도에 따른 농도 분포의 차이를 거의 보이지 않는 것을 볼 수 있다. 하지만 그림 8에서와 같이 4 keV 및 5 keV 에너지 비소(As) 이온 주입시에는 경사도 7° 인 경우는 0° 인 경우에 대하여 깊이 방향 농도 분포가 절반 이상 줄어든 것을 볼 수 있다. 이와 같이 4 keV 에너지 이상의 비소(As) 이온 주입시에는 채널링 현상에 대한 신중한 고려가 필요하다는 것을 알 수 있다. 또한 위의 결과들로부터 50 nm 채널 깊이와 20 nm 접합 깊이를 얻기 위하여 붕소의 경우 0.5 - 1 keV, 그리고 인의 경우 2 - 4 keV, 그리고 비소의 경우 5 - 15 keV^[19] 정도의 에너지 영역이 될 것으로 사료된다.

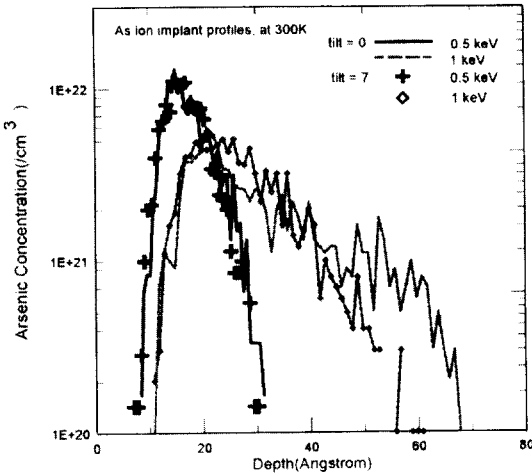


그림 7. 0.5 keV, 1 keV 에너지 비소(As) 이온 주입시 경사도 0° 및 7° 인 경우의 계산된 1차원적인 불순물의 분포

Fig. 7. Calculated dopant profiles due to tilt angle at 300 K, in the cases of 0.5 keV and 1 keV arsenic ion implant.

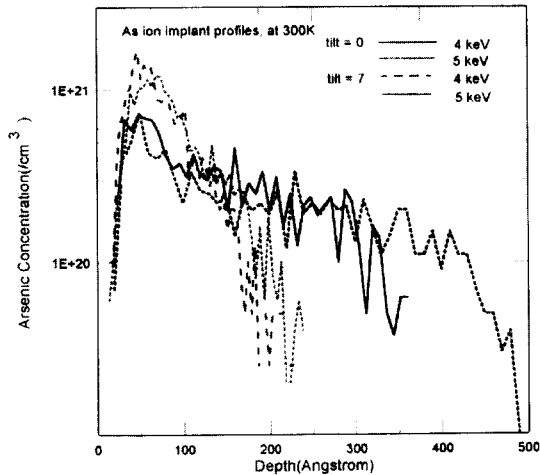


그림 8. 4 keV, 5keV 에너지 비소(As) 이온 주입시 경사도 0° 및 7° 인 경우의 계산된 1차원적인 불순물의 분포

Fig. 8. Calculated dopant profiles due to tilt angle at 300 K, in the cases of 4 keV and 5 keV arsenic ion implant.

그림 9는 1 keV 붕소(B) 이온 주입시 경사도에 따른 2차원적인 분포를 보여주고 있다. 경사도 7° 인 경우의 분포는 경사도 0° 인 경우와 비교하여 농도 분포가 깊이 방향으로 절반 정도 줄어든 것을 볼 수 있지만, 농도 분포가 측면 방향으로 거의 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 10은 2 keV 인(P) 이온

주입시 경사도에 따른 2차원적인 농도분포를 보여주고 있다. 인의 경우도 붕소의 경우와 마찬가지로 경사도 7° 인 경우 깊이 방향 농도 분포가 절반정도 줄어들었지만, 측면 방향으로의 농도분포는 거의 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 11은 5 keV 비소(As) 이온 주입시 경사도에 따른 2차원적인 농도 분포를 보여주고 있다. 비소도 붕소와 인의 경우와 마찬가지로 분포를 볼 수 있다. 채널링 현상이 발생하는 극저 에너지 이온 주입에 대하여 각 불순물들의 깊이 방향 분포는 경사도 7° 로 이온 주입한 경우가 경사도 0° 인 경우보다 절반 이상 줄었지만, 측면 방향 분포는 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 50 nm 채널 깊이 및 20 nm 접합깊이를 가진 MOS 소자 제조에 사용될 수 있는 1 keV 붕소, 2 kV 인 및 5 keV 비소 이온 주입시 경사도 0° 일 때 보다 경사도 7° 일 때 깊이 방향으로의 불순물을 크게 감소시키지만 측면 방향으로의 차이가 미미하다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 나노미터 영역의 초 미세 접합 형성을 위한 극저 에너지 이온 주입에서 깊이 방향으로 발생하는 채널링 현상은 경사도 7° 이온 주입으로 억제할 수 있지만, 측면 방향으로 발생하는 채널링 현상은 경사도에 따른 차이가 거의 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다.

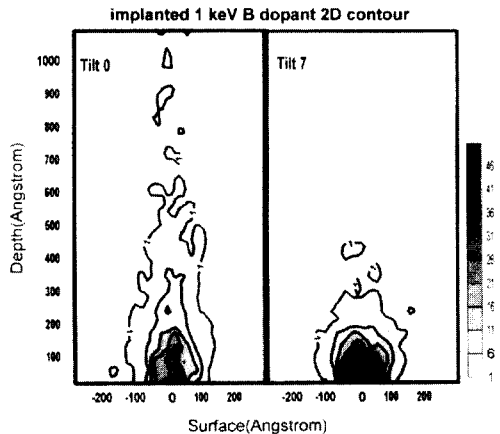


그림 9. 1 keV 붕소(B) 이온 주입시 경사도 0° 및 7° 인 경우의 2차원적인 불순물의 분포. 각 윤곽선의 값들은 2차원적으로 축적된 불순물의 개수이다.

Fig. 9. In the case of 1 keV energy boron ion implant, 2-dimensional dopant profile with tilt 0° and tilt 7°. Labels on contour are the number of 2 dimensionally accumulated dopant.

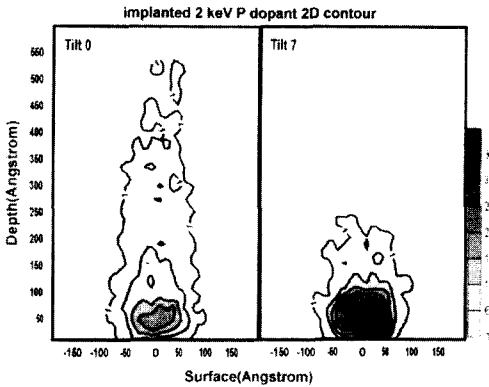


그림 10. 2 keV P 이온 주입시 경사도 0° 및 경사도 7° 인 경우의 2차원적인 불순물의 분포. 각 윤곽선의 값들은 2차원적으로 축적된 불순물의 개수이다.

Fig. 10. In the case of 2 keV energy phosphorus ion implant, 2-dimensional dopant profile with tilt 0° and tilt 7°. Labels on contour are the number of 2 dimensionally accumulated dopant.

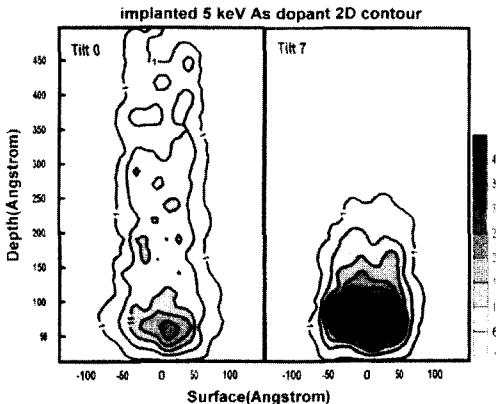


그림 11. 5 keV As 이온 주입시 경사도 0° 및 경사도 7° 인 경우의 2차원적인 불순물의 분포. 각 윤곽선의 값들은 2차원적으로 축적된 불순물의 개수이다.

Fig. 11. In the case of 5 keV energy arsenic ion implant, 2-dimensional dopant profile with tilt 0° and tilt 7°. Labels on contour are the number of 2 dimensionally accumulated dopant.

IV. 결 론

본 연구에서는 초미세 접합형성을 위한 극 저 에너지 이온주입시 경사도에 따른 불순물의 농도 분포를 계산함으로써 채널링 현상이 불순물 농도 분포에 미치는

영향이 논의되었다. 경사도에 따른 불순물의 1차원적인 농도분포를 통하여 이온 종류에 따른 채널링 현상이 불순물의 농도 분포에 크게 영향을 미치는 에너지 영역에 관하여 연구하였다. 붕소(B)는 500 eV 이상이 에너지 이온 주입시 채널링 현상에 대한 고려가 필요함을 알 수 있다. 또한 인(P)의 경우 2 keV 에너지 이상, 그리고 비소(As)의 경우 대략 4 keV 에너지 이상에서 채널링 현상이 불순물의 분포에 크게 영향을 미치게 되는 것을 시뮬레이션을 통하여 알 수 있었다. 또한 1 keV 붕소, 2 keV 인, 그리고 5 keV 비소 이온 주입의 2차원적인 농도분포를 통하여 극 저 에너지 이온 주입에서는 측면 방향보다는 깊이 방향으로 채널링되는 경우들이 불순물의 분포에 더욱 크게 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 극 저 에너지 이온 주입 기술을 이용한 수십 나노미터 영역 접합 깊이 형성을 위하여서는 깊이 방향으로의 불순물 채널링 현상이 반드시 고려되어야 될 것으로 사료된다. 또한 극 저 에너지 이온 주입 후 열처리 공정(post annealing) 효과가 최종 불순물 분포에 미치는 영향이 큰 문제로 인식되고 있으므로, 극 저 에너지 이온 주입과 연계된 원자단위 확산에 관한 연구가 수행될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] "National Technology Roadmap for Semiconductors," SIA (1994).
- [2] E. Chason, S.T. Pictraux, J.M. Poate, L.O. Borland, M.I. Current, T. Diaz de la Rubia, D.J. Eaglesham, O.W. Jolland, M.E. Law, C.W. Magee, J.W. Mayer, J. Melngailis, and A.F. Rasch, "Ion beams in silicon processing and characterization", J. Appl. Phys., **81**(10), p. 6513 (1997).
- [3] Kenjiro SUGIO, Yoshiharu SHIMOMURA and Tomas D. de la RUBIA, "Computer Simulation of Displacement Damage Cascade Formation near Sigma 5 Twist Boundary in Silver", JPSJ, vol. **67**, no. 3, p. 882 (1998).
- [4] T. D. de la Rubia, N. Soneda, M.J. Caturla, and E.A. Alonso, "Defect production and annealing kinetics in elemental metals and semiconductors", J.

- Nuclear Materials, **251**, p. 13 (1997).
- [5] D.J. Bacon, A.F. Calder, and F. Gao, "Defect production due to displacement cascades in metals as revealed by computer simulation", J. Nuclear Materials, **251**, p. 1 (1997).
- [6] R.E. Stoller, "Point defect survival and clustering fractions obtains from molecular dynamics simulations of high energy cascades", J. Nuclear Materials, **233-237**, p. 999 (1996).
- [7] H.L. Heinisch, and B.N. Singh, "Stochastic annealing simulation of differential defect production in high energy cascades", J. Nuclear Materials, **232**, p. 206 (1996).
- [8] T.D. de la Rubia, J.M. Perlado, and M. Tobin, "Radiation effects in silicon carbide : High energy cascades and damage accumulation at high temperature", J. Nuclear Materials, **233-237**, p. 1096 (1996).
- [9] M.J. Caturla, T.D. de la Rubia, L.A. Marques, and G.H. Gilmer, "Ion-Beam processing of silicon at keV energies : A molecular-dynamics study", Phys. Rev. B **54**, p. 16683 (1996).
- [10] K. Nordlund, "Molecular dynamics simulation of ion ranges in the 1-100 keV energy range", Comp. Mat. Sci. **3**, p. 448 (1995).
- [11] 강정원, 손명식, 강유석, 황호정, "고전 분자 동역학 시뮬레이션을 이용한 실리콘 격자 손상과 극저에너지 붕소 이온 주입에 관한 연구" 전자공학회논문지-D 제35권 D편 제 12호 pp. 30(1998); 마스크 구조 인식하여 이온 주입이 이루어지는 영역에 들어가는 이온의 수를 조절함으로써 도즈에 따른 효과를 살펴볼 수 있도록 향상되었으며, 또한 극부 격자결함 축적 모델이 포함되어 격자결함을 고려한 에너지 및 도스에 관한 시뮬레이션 결과들은 1999년 3월 28-31일 개최예정인 Ultra-Shallow Junction-99 Workshop(Research Triangle Park, North Carolina, USA)에 발표예정임
- [12] R. Smith, D.E. Harrison, Jr., Computers in Physics **Sep/Oct 1989**, 68 (1989).
- [13] W. Brandt and M. Kitagawa, Phys. Rev. B **25**, p. 5631 (1982).
- [14] D. Cai, N. G-Jensen, C.M. Snell, and K.M. Beardmore, Phys. "Phenomenological electronic stopping-power model for molecular dynamics and Monte Carlo simulation of ion implantation into silicon", Rev. B **54**, p. 17147 (1996).
- [15] K.M. Beardmore and N. G-Jensen, "Efficient molecular dynamics scheme for the calculation of dopant profiles due to ion implantation", Phys. Rev. E **57** (1998).
- [16] "Atomic and ion collisions in solids and at surfaces : theory, simulation and application", edited by R. Smith, Cambridge Univ. Press (1997); O.B. Firsov, Soviet Physics JETP **36(9)** (1959).
- [17] N.E.B. Cower et al., "Low energy implantation and transient enhanced diffusion : Physical mechanics and technology implications", MRS vol. **469**, p. 265 (1997).
- [18] G. Hobler, H.H. Vuong, J. Bevk, A. Agarwal, H.J. Gossmann, D.C. Jacobson, "Modeling of ultra-shallow energy boron implantation in silicon", IEDM 97, p. 489 (1997).
- [19] 강정원, 황호정, "Molecular dynamics study on sharply shallow junction formation by channeling effects : low energy As ion implant", 제6회 한국반도체 학술대회 발표예정, 연세대학교, 2월 11일 (1999)