

Si(100)에 이온 주입 시 에너지, 조사량과 빔 전류에 따른 면저항의 변화

김형인 · 정영완 · 이명희 · 강석태*

연세대학교 물리학과, 원주 220-710

(2010년 12월 23일 받음, 2011년 1월 29일 수정, 2011년 3월 7일 확정)

이온을 Si(100) 기판에 주입할 때 조사량과 에너지, 빔 전류가 면저항에 영향을 미치는 원인을 규명하기 위해 여러 연구자가 행하였던 실험과 동일한 조건으로 Crystal TRIM 프로그램을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실행하였다. 주입한 As⁺이온의 조사량을 1×10¹⁵/cm²로 일정하게 하고 에너지를 5, 10, 15 keV로 변화시켜 계산한 결과 에너지가 커질수록 Rp값은 표면에서 깊어지는 반면에, 표면근방에 축적되는 격자손상은 증가하였다. 20keV의 B⁺이온을 5×10¹⁵/cm²의 동일한 조사량으로 1mA와 7 mA의 빔 전류에 해당하는 값을 이용하여 계산한 결과 빔 전류가 커질수록 표면근방 100 nm 이내에서 격자손상이 증가 하였다. 20 keV의 일정한 에너지로 B⁺이온을 1×10¹⁵, 3×10¹⁵/cm² 조사량과 0.8 mA와 8 mA의 빔 전류로 각각 계산한 결과 조사량이 많아질수록, 빔 전류가 커질수록 표면 근방에 축적되는 격자손상의 양이 증가하였다. 이러한 에너지, 조사량과 빔 전류 증가에 의한 시료표면의 격자손상 증가는 시료표면의 면저항을 감소시킨다.

주제어 : Si(100), 주입전류, 깊이방향분포, 격자손상분포, Crystal TRIM

I. 서 론

ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductor)에서는 더욱 고집적적인 트랜지스터 개발을 위해 트랜지스터의 고집적화와 관련된 목표를 주기적으로 설정해왔다. 최근 ITRS에 따르면 오는 2013년까지 모든 반도체 게이트의 길이는 13 nm를 목표로 하고 있고 이 목표에 도달하기 위해서는 접합깊이 역시 큰 폭으로 감소되어야만 한다.

접합깊이를 감소시키기 위해서는 낮은 에너지 이온 주입법이 필수적으로 요구된다. 그러나 낮은 에너지 이온 주입법은 많은 문제점들을 야기하게 된다. 예를 들면 MOS (Metal Oxide Semiconductor) 트랜지스터의 경우 접합깊이를 감소시키면 금속과 반도체 사이의 접촉저항이 증가하여 전력소모가 증가한다는 문제점이 발생하게 된다.

따라서 낮은 주입 에너지를 이용하여 일정한 접합깊이를 유지하면서 면저항 또한 감소시키기 위한 노력으로 여러 연구자들에 의해 많은 실험들이 진행되어 왔다 [1-4]. 그 중에서도 이온 주입 과정 중 조절할 수 있는 입사이온의 에너지, 조사량(dose), 빔 전류 등이 시료의 면저항에 영향

을 주고 있음이 최근의 일련의 실험을 통하여 밝혀졌다.

본 연구는 Crystal TRIM 시뮬레이션 [5-7]을 이용하여 에너지, 빔 전류, 조사량을 변화시켜가며 깊이방향 분포와 격자손상분포를 계산함으로써 표면근방에서의 이온의 분포와 격자손상분포에 따라 시료의 면저항이 변화하는 원인을 체계적으로 규명하고자 한다.

II. 컴퓨터 시뮬레이션

이온을 시료에 입사시키면 초기에 가지고 있던 에너지는 시료 속을 지나면서 입사이온과 시료원자와의 충돌과정을 거치면서 핵과의 충돌로 인한 에너지 손실과 전자와의 충돌로 인한 에너지 손실로 모두 소진되고, 결국 시료 내의 한 곳에 정지하게 된다. 입사된 이온은 시료원자와 무수한 연쇄충돌(collisional cascade)을 일으키게 되고 이는 시료의 격자손상의 원인이 된다. TRIM (TRansport of Ions in Matter) 시뮬레이션 [8]은 주입이온의 에너지가 모두 소진될 때까지 주입이온의 에너지 손실과정과 충돌위치 및 산란각, 시료원자의 되튐 움직임 등을 모두 기록하여 이온 주

* [전자우편] stkang@yonsei.ac.kr

입 조건에 따른 이온의 농도분포 및 격자손상분포(damage profile) 등의 많은 정보를 준다 [8,9]. TRIM은 시료를 비정질로 가정하여 만든 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램이나, 그 후에 독일의 Posselt 박사 [5-7]는 1991년부터 시료의 결정성을 고려하여 Crystal TRIM 프로그램을 개발하였다. Crystal TRIM을 이용하여 결정에서 비정질 층의 형성과정을 포함하는 격자손상 축적의 역학적인 시뮬레이션을 행하여, 이온을 주입하는 동안에 일어나는 채널링 효과와 결정의 손상 변화를 계산할 수 있다. 또한 이온이 시료원자와 충돌하는 동안에 생성된 격자손상이 회복되고 남은 정도를 나타내는 매개변수인 cacc 값 [7-9]과 이온 주입된 영역이 비정질로 변화하는 임계값 등을 도입하여 빔 전류 변화에 따른 깊이방향 분포와 격자손상분포를 계산할 수 있다.

본 시뮬레이션은 다음의 세 조건으로 수행되었다. 첫째로 As⁺이온의 조사량과 빔 전류를 1×10¹⁵/cm²과 1 mA로 고정하고 에너지를 5, 10, 15 keV로 각각 계산하였다. 오차를 최대한 줄이기 위하여 계산 반복 횟수는 100,000번으로 하였고 시료의 온도는 실온 300 K로 설정하였다. 두 번째 시뮬레이션에서는 20 keV B⁺이온의 조사량을 5×10¹⁵/cm²로 고정하고 빔 전류를 1 mA와 7 mA로 다르게 하여 Si(100)시료에 주입하는 것으로 설정하였다. 세 번째 시뮬레이션에서는 B⁺ 이온의 주입 에너지를 20 keV로 고정하고 1×10¹⁵/cm², 3×10¹⁵/cm²의 조사량과 0.8 mA, 8 mA의 빔 전류를 각각 조절하여 깊이방향 분포와 격자손상분포를 계산하였다.

III. 결과 및 논의

일정한 조사량의 As⁺ 이온을 Si(100)시료에 주입한 경우에 에너지 변화에 따라 주입된 이온의 깊이분포를 Crystal TRIM 프로그램으로 계산하였다.

Fig. 1은 As⁺ 이온을 동일한 1×10¹⁵/cm²의 조사량으로 각각 5, 10, 15 keV의 에너지로 증가시켜가면서 Si(100)시료에 주입한 경우의 깊이방향분포이다.

주입 에너지를 증가시킬 때에 As⁺ 이온의 농도가 최대인 깊이 R_p 값은 각각의 에너지에 따라 3, 7, 11 nm로 시료 내부로 깊어지는 것을 볼 수 있다. 입사 에너지가 증가함에 따라서 R_p에서의 As⁺ 이온의 농도는 2×10²¹/cm³, 1×10²¹/cm³, 7×10²⁰/cm³으로 낮아진다.

Fig. 2는 Fig. 1과 동일한 조건으로 컴퓨터 시뮬레이션하여 계산한 격자손상분포이다. 표면으로부터 비정질이 되기 시작하여 수직으로 급격히 떨어지는 부분까지의 깊이방향분포가 비정질 층의 두께가 되며 격자손상의 농도는 1×10²¹/cm³ 정도에서 비정질 층이 됨을 알 수 있다 [10].

5, 10, 15 keV 에너지에 따른 비정질 층의 두께는 각각 11, 19, 26 nm로 D. Girginudi et al. [11]이 TEM (Transmission Electron Microscopy)으로 측정된 비정질 층 두께인 12, 22, 28 nm와 거의 일치한다. 이러한 현상은 에너지가 증가할수록 입사이온과 시료의 원자 사이에 연쇄충돌이 증가하여 표면근방에 많은 격자손상을 축적하는 것이다. D. Girginudi의 실험 결과인 면저항값 [11]은 에너지가 증가하여 표면근방에 축적되는 격자손상이 증가할수록 면저항값은 각각 330, 210, 170 Ω/□로 감소하는 경향을

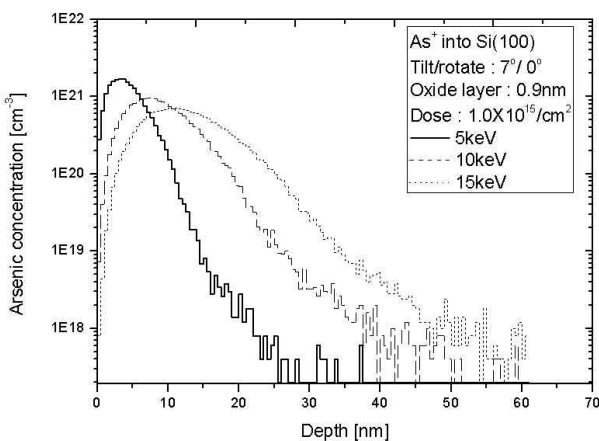


Figure 1. Depth profiles of As⁺ ions implanted into Si(100) with varying ion energy.

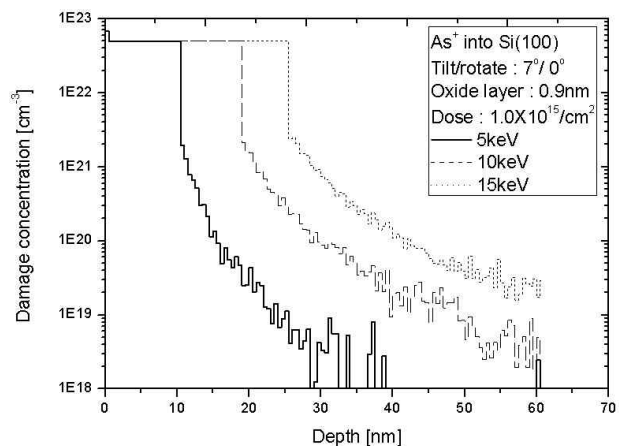


Figure 2. Damage profiles of As⁺ ions implanted into Si(100) with varying ion energy.

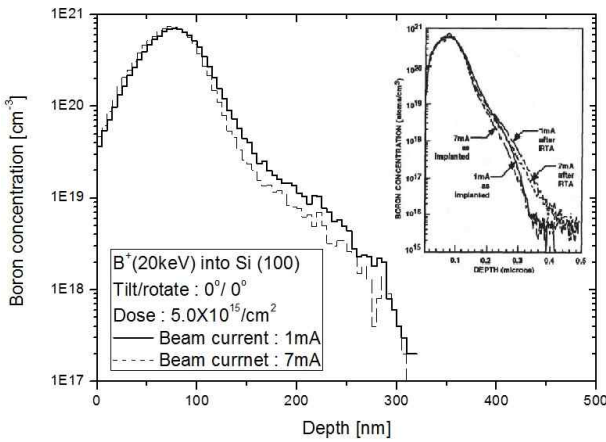


Figure 3. Depth profiles of B⁺ ions implanted Si(100) with varying ion beam current (In set is the experimental result of R. Simonton et al [13]).

보인다.

Fig. 3은 에너지와 조사량을 20 keV, $5 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 로 일정하게 고정하고 B⁺ 이온의 빔 전류만을 1 mA와 7 mA로 변화시켜 Si(100)표면에 주입시켰을 경우에 컴퓨터 시뮬레이션 한 깊이방향 분포 결과이다. 빔 전류가 1 mA와 7 mA 일 경우 각각의 R_p 값은 75 nm, 80 nm로서 R_p값과 표면 근방에서의 B⁺ 이온 분포의 모양에는 큰 변화가 없지만, 빔 전류를 7 mA로 증가시킨 경우에는 깊이방향 분포의 꼬리 부분이 1 mA인 경우에 비해서 표면 쪽으로 올라오는 것을 볼 수 있다.

이러한 컴퓨터 시뮬레이션의 결과는 Fig. 3의 오른쪽 위에 그려 넣은 R. Simonton의 실험 결과 [12]와 일치한다. B⁺ 이온이 Si(100)시료에 동일한 에너지와 조사량으로 입사되었음에도 불구하고 빔 전류를 증가시킬 경우 이온이 주입되는 동안에 시료의 격자가 격자손상을 회복하는데 걸리는 시간이 짧아지게 되므로 주입이온의 깊이방향분포의 꼬리부분이 표면 쪽으로 올라온다는 연구결과를 우리 [13-15]는 이미 밝힌바 있다.

Fig. 4는 Fig. 3과 같은 조건으로 Si 시료의 격자손상분포를 컴퓨터 시뮬레이션한 결과이다. 격자손상분포는 깊이방향 분포와는 다르게 빔 전류가 증가함에 따라 격자손상농도의 꼬리 부분에서는 차이가 보이지 않으나 표면 근방에서는 격자손상분포의 농도가 증가하는 것을 알 수 있다.

1 mA와 7 mA 이온 주입 후 R. Simonton이 측정한 면저항값 [12]은 각각 110, 60 Ω/□로서 빔 전류의 증가에 따라 시료표면 근방에 격자손상농도가 증가할수록 면저항이

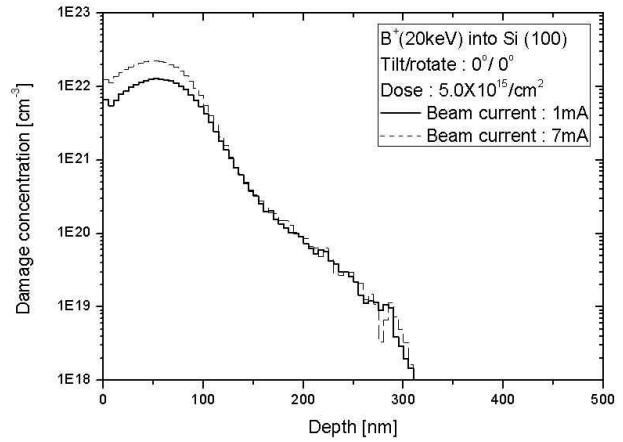


Figure 4. Damage profiles of B⁺ ions implanted Si(100) with varying ion beam current.

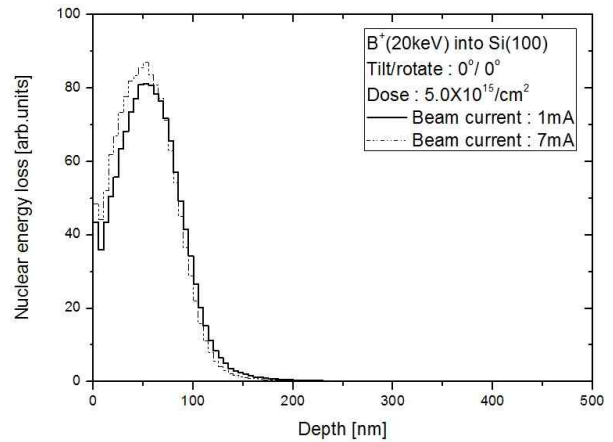


Figure 5. Nuclear energy deposition of B⁺ ions implanted Si(100) with varying ion beam current.

감소하는 경향을 볼 수 있다.

Fig. 5는 입사이온이 시료 속을 진행할 때에 시료원자와 충돌하며 잃어버리는 핵에 의한 에너지 손실을 계산한 결과로서 에너지손실을 명확히 보기 위하여 세로축을 log scale에서 normal scale로 변환하여 plot하였다. 주입 이온의 빔 전류를 증가시킬 경우에 동일한 에너지와 동일한 조사량 임에도 불구하고 표면 근방에 핵에 의한 에너지 손실이 증가함을 볼 수 있고 이것은 Fig. 4의 격자손상분포의 차이를 잘 설명해주고 있다.

Fig. 6은 20 keV B⁺ 이온의 빔 전류를 0.8 mA와 8 mA로, 조사량을 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$, $3 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 로 각각 조절하여 Si(100)시료에 주입한 후에 깊이방향 분포를 Crystal TRIM 프로그램으로 시뮬레이션한 결과이다.

$3 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 의 조사량을 기준으로 빔 전류가 0.8 mA에

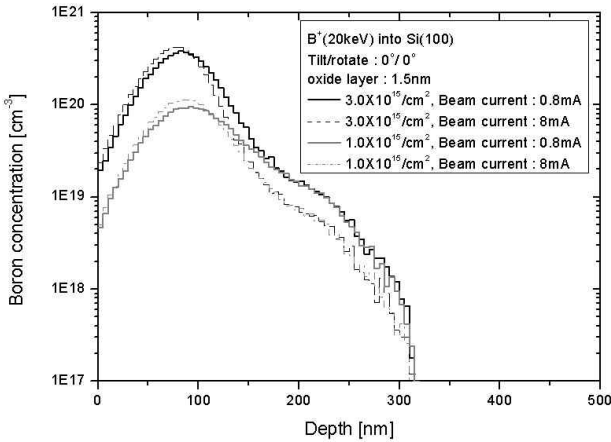


Figure 6. Depth profiles of B⁺ ions implanted into Si(100) with varying doses and beam currents.

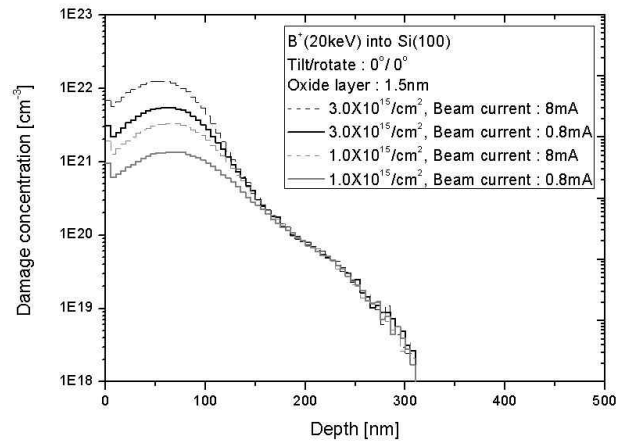


Figure 7. Damage profiles of B⁺ ion implanted Si(100) with varying doses and beam currents.

서 8 mA로 증가할 경우의 깊이방향 분포 변화를 살펴보면 각각의 R_p 값이 동일한 값인 85 nm로서 빔 전류 증가에 대한 표면 근방에서의 깊이방향 분포는 차이가 없는 반면 깊이방향 분포의 꼬리부분에서는 Fig. 3의 결과와 같이 빔 전류가 증가할수록 깊이방향 분포의 꼬리 부분이 표면 쪽으로 올라가는 것을 알 수 있다.

1×10¹⁵/cm²의 조사량을 기준으로 빔 전류가 0.8 mA에서 8 mA로 증가할 경우의 깊이방향 분포 변화를 살펴보면 R_p 값이 각각 동일한 값인 90 nm로써 빔 전류 증가에 따른 깊이방향 분포의 변화는 조사량이 3×10¹⁵/cm²일 경우와 같은 경향을 보이고 있다.

그러나 조사량이 3×10¹⁵/cm²일 경우와 1×10¹⁵/cm²일 경우의 깊이방향 분포를 비교한 결과 조사량을 3×10¹⁵/cm²로 증가시킬 때가 1×10¹⁵/cm²일 때에 비해 시료 표면 근방에 분포하는 B⁺이온의 농도가 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 같은 조건으로 Crystal TRIM 시뮬레이션 하여 격자손상분포를 계산한 결과이다.

3×10¹⁵/cm²의 조사량을 기준으로 빔 전류가 8 mA와 0.8 mA일 경우 표면에 축적된 격자손상은 각각 7×10²¹/cm³, 3×10²¹/cm³값을 보인다. 1×10¹⁵/cm²의 조사량을 기준으로 빔 전류가 8 mA와 0.8 mA일 경우 표면에 축적된 격자손상은 각각 2×10²¹/cm³, 9×10²⁰/cm³값을 보인다.

이를 통해 조사량이 많고 빔 전류가 커질수록 표면근방에 축적되는 격자손상이 증가한다는 것을 알 수 있고 격자손상이 축적되는 순서에 따라 M. I. Current가 측정된 면저항값 [16]은 2,000, 1,500, 1,400, 700 Ω/□으로 감소하는 경향을 보인다.

따라서 이온 주입 시 조사량과 빔 전류가 증가함에 따라 면저항값이 감소하는 현상은 표면근방에 축적되는 격자손상의 증가에 따른 것임을 알 수 있다.

또한 조사량과 빔 전류가 각각 3×10¹⁵/cm², 0.8 mA일 경우와 1×10¹⁵/cm², 8 mA일 경우를 비교한 결과 3배 차이의 조사량에도 불구하고 면저항에 큰 차이가 없고, 표면근방 격자손상 역시 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이를 통해 Si(100)에 주입된 이온의 조사량이 많다 하더라도 표면 근방에 격자손상이 충분히 축적되지 않으면 주입된 이온들은 시료의 전기적 활성화에 기여하지 않는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

반도체 공정 중에서 Si 시료에 이온을 주입하는 과정은 매우 중요한 단계이다.

주입하는 이온의 에너지와 빔 전류 그리고 조사량의 변화에 따라 면저항이 변화하는 원인을 Crystal TRIM 프로그램을 이용하여 깊이방향 분포와 격자손상분포 및 핵에 의한 에너지 손실을 시뮬레이션함으로써 분석하였다. 그 결과 에너지를 증가시켜 As⁺ 이온을 주입하였을 때 격자손상분포를 시뮬레이션한 결과 격자손상의 증가에 따라 비정질 층의 두께도 증가하게 되고 이러한 경우 면저항역시 감소하는 경향을 실험 data와 격자손상분포를 비교하여 확인할 수 있었다.

동일한 에너지와 조사량의 B⁺ 이온을 빔 전류만을 증가시켜 주입할 경우 표면근방에서 축적되는 격자손상의 양이

증가하는 것을 알 수 있다.

B^+ 이온의 조사량과 빔 전류를 각각 변화시켜 깊이방향 분포와 격자손상분포를 시뮬레이션한 결과 깊이방향 분포에는 조사량의 증가에 대한 표면 근방의 농도증가를 확인할 수 있지만 빔 전류 증가에 대한 깊이방향 분포 변화는 크게 나타나지 않았다. 그러나 격자손상분포를 통해 조사량과 빔 전류를 증가시킬수록 표면에 많은 격자손상이 축적됨을 알 수 있고 격자손상이 많이 축적될수록 면저항이 감소함을 알 수 있다.

따라서 이온 주입 시 에너지와 조사량 그리고 빔 전류 증가에 의한 표면근방의 격자손상농도 증가가 시료의 전기적 활성화에 기여한다는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 이온의 조사량을 증가시켜 주입하더라도 시료 표면 근방에 빔 전류에 의한 격자손상이 충분히 축적되지 않으면 주입된 이온들이 시료의 전기적 활성화에 기여하지 않는 것을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2010년 연세학술연구비에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] I. Mizushima, A. Murakoshi, K. Suguro, N. Aoki, and J. Yamauchi, *Materials Chemistry and Physics* **54**, pp.54-59 (1998).
- [2] G. Fuse, M. Sano, H. Murooka, T. Yagita, M. Kabasawa, T. Siraishi, Y. Fujimoto, N. Suetsugu, H. Kariya, H. Izutani, and M. Sugitani, *Nucl. Instr. and Meth. B* **237**, 77 (2005).
- [3] M. Koh, K. Egusa, H. Furumoto, T. Shirakata, E. Seo, K. Shibahara, S. Yokoyama, and M. Hirose, *Japan. J. Appl. Phys.* **38**, 2324 (1994).
- [4] T. L. Alford, D. C. Thompson, J. W. Mayer, and N. David Theodore, *J. Appl. Phys.* **106**, 114902 (2009).
- [5] M. Posselt, *Radiat. Eff. Defects Solids* **130**, 87 (1994).
- [6] M. Posselt, M. Maxder, R. Grotzschel, and M. Behar, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 545 (2003).
- [7] M. Posselt, J. Teichert, L. Bischoff, and S. Hausmann, *Nucl. Instr. and Meth. B* **178**, 170 (2001).
- [8] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and U. Littmark, *The Stopping and Range of Ions in Solids* (Pergamon Press, New York, 1995), p. 202.
- [9] M. Nastasi, J. W. Mayer, James, and K. Hirvonen, *Ion Solid Interaction : Fundamentals and Applications* (Cambridge University Press, Newyork 1996), p. 141.
- [10] M. Posselt, B. Schmidt, C. S. Murthy, T. Feudel, and K. Suzuki, *J. Electrochem. Soc.* **144**, 4 (1997).
- [11] D. Girginoudi, N. Georgoulas, A. Thanailakis, and E. K. Ploychroniadis, *Materials Science and Engineering. B* **114-115**, 381-385 (2004).
- [12] R. Simonton, J. Shi, T. Boden, P. Maillot, and L. Larson, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **316**, 153-158 (1994).
- [13] I. B. Sung, J. K. Kim, Y. S. Yoo, B. Y. Jeong, and S. T. Kang, *J. Kor. Phys. Soc.* **46**, 478 (2005).
- [14] B. Y. Jeong, Y. S. Yoo, H. C. Lee, M. C. Park, and S. T. Kang, *SAEMULLI (New Phys.)* **53**, 221 (2006).
- [15] M. C. Park, H. C. Lee, Y. K. Park, K. N. Lee, and S. T. Kang, *SAEMULLI (New Phys.)* **56**, 523 (2008).
- [16] M. I. Current, N. Ohno, and T. Hara, *Nucl. Instr. and Meth. B* **121**, 262 (1997).

Sheet Resistance of Ion Implanted Si(100) at Various Doses, Energies and Beam Currents

Hyung In Kim, Young Wan Jeong, Myeung Hee Lee, and Suk Tai Kang*

Department of Physics, Yonsei University, Wonju 220-710

(Received December 23, 2010, Revised January 29, 2011, Accepted March 7, 2011)

Simulations were performed using Crystal TRIM software under the same conditions used by previous researchers in order to clarify the mechanism that determines sheet resistance various doses, energies and beam currents. The results showed that the peak of the depth profile (R_p) in the same sample gradually shifts inward and damage increases near the surface as the energy increases for As^+ equal dose of $1 \times 10^{15}/cm^2$ implanted into Si(100) energies of 5, 10, and 15 keV. From a theoretical calculation of B^+ ion implantation processes at energy of 20 keV using parameters that correspond to 1 mA and 7 mA beam currents with the same dose of $5 \times 10^{15}/cm^2$, it was found that the higher beam currents resulted in more damage near the surface (< 100 nm). Likewise, In the simulations employing sets of doses ($1 \times 10^{15}/cm^2$, $5 \times 10^{15}/cm^2$) and beam currents (0.8 mA, 8 mA), more damage was produced at larger doses and higher current. Thus, sheet resistance at the surface was reduced by the intensified damage from increases in beam energy, dose and beam currents.

Keywords : Si(100), Beam current, Depth profile, Damage profile, Crystal TRIM

* [E-mail] stkang@yonsei.ac.kr