

저 에너지 이온 주입의 개선을 위한 변형된 감속모드 이온 주입의 안정화 특성

Stabilization of Modified Deceleration Mode for Improvement of Low-energy Ion Implantation Process

서용진*, 박창준*, 김상용**

(Yong-Jin Seo*, Chang-Jun Park*, and Sang-Yong Kim**)

Abstract

As the integrated circuit device shrinks to the deep submicron regime, the ion implantation process with high ion dose has been attracted beyond the conventional ion implantation technology. In particular, for the case of boron ion implantation with low energy and high dose, the stabilization and throughput of semiconductor chip manufacturing are decreasing because of trouble due to the machine conditions and beam tuning of ion implanter system. In this paper, we focused to the improved characteristics of processing conditions of ion implantation equipment through the modified deceleration mode. Thus, our modified recipe with low energy and high ion dose can be directly apply in the semiconductor manufacturing process without any degradation of stability and throughput.

Key Words : Ion implantation, Deceleration mode, Drift mode, High dose, Low energy

1. 서 론

반도체 소자가 고집적화 됨에 따라 종래의 이온 주입 기술에 비해 높은 도즈(dose)를 갖는 이온주입을 수행하는 공정이 점차 추가되고 있다[1, 2]. 특히, 높은 도즈의 보론을 낮은 에너지로 이온 주입하는 공정[3-6]을 진행할 경우 빔 튜닝(beam tuning)과 장비의 조건에 따른 부하 때문에 공정의 안정성과 생산성이 줄어들고 있다[7]. 따라서 이온 빔을 생성하는 방법 중 감속 모드(deceleration mode)의 적용을 통해 저 에너지 이온주입 공정이

갖는 단점을 개선하기 위한 변형된 이온 주입 공정을 수행하였다. 일반적으로 이온빔은 이온화된 도판트(dopant)를 추출(extraction) 전압으로 가속시키고 분석기(analyzer)를 통과하여 빔의 초점을 맞춘 후, 다시 원하는 에너지로 가속을 시키고 있다[8, 9]. 이 과정에서 저 에너지 빔을 사용할 경우, 추출 전압이 작아 이온화된 도판트(dopant)를 효율적으로 끌어내지 못하고 빔이 퍼지게 되어 빔 생성이 어렵게 된다. 이를 막기 위해 높은 추출 전압을 사용하여 빔 생성을 극대화시킨 후, 원하는 에너지로 감속시켜 장비의 효율을 최적화시킬 수 있다[10, 11].

본 논문에서는 기존의 드리프트 모드와는 달리 감속모드로 이온 주입 조건을 변경하여 이온주입 전과 후의 입자 분석, 비파괴 계수 검사, 면저항, TRXRF (Total Reflection X-Ray Fluorescence) 측정, SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy)

* : 대불대학교 전기공학과

(전남 영암군 삼호면 산호리 대불대학교,

Fax: 061-469-1265

Corresponding Author: syj@mail.daebul.ac.kr)

** : 아남반도체 FAB 사업부

2002년 9월 11일 접수, 2002년 10월 22일 1차 심사 완료,

2003년 1월 9일 최종 심사 완료.

분석, 빔의 튜닝 조건 등을 테스트하여 이온 주입기의 에너지 감속으로 인한 에너지 변동 및 감속의 오염 정도와, 도즈의 정확성을 검증함으로써 반도체 웨이퍼 칩의 제조 공정에 적용하고자 하는 데 그 목적이 있다.

2. 실험

본 실험에서는 도즈의 정확성을 고찰하기 위해 면저항 (R_s : sheet resistance) 데이터와 SIMS 프로파일을 분석하였고, 에너지 변동은 SIMS 프로파일의 R_p (projected range)를 비교 분석하여 확인하였다. 감속 오염 정도를 분석하기 위해 TRXRF와 SIMS 두 가지 방법을 동시에 사용하였다.

기존의 반도체 제조 공정에 보편적으로 사용되고 있는 이온 주입 공정 조건(이온주입 원소는 $11B^+$, 주입에너지는 20 keV, 이온 주입 도즈는 $3.5E13/cm^2$, tilt/twist=0°/0°, 빔전류는 $\sim 475 \mu A$)을 본 실험에서는 이온 주입 도즈를 더 높이고, tilt/twist 각도에 변화를 준 새로운 공정조건($11B^+$, 20 keV, $1.0E14/cm^2$, tilt/twist = 7°/337°, $I_b = \sim 475 \mu A$)으로 변경하여 진행하였다. R_s 데이터의 신뢰성을 높이기 위하여 높은 이온 도즈를 이용하여 R_s 값을 낮추어 주었으며, 빔 이온 주입 동안 웨이퍼를 기울이거나 회전시키는 tilt/twist의 조건을 변경한 것은 보론의 채널링(channeling) 현상[10]을 방지하기 위해 고려되었다. 실험은 VARIAN사의 EHP-500 주입 장비를 이용하였으며, 표 1에 보인 바와 같이 감속모드(extraction energy = 40 keV, deceleration energy = 20 keV)와 드리프트 모드(extraction energy : 20 keV only)로 나누어 두 그룹의 실험을 진행하여 비교하였다.

표 1. 실험에 사용한 공정 조건의 요약.
Table 1. Summarization of recipe using in experiment.

표 1은 본 실험에서 새로 변경하여 적용한 이온 주입 조건 및 각 모드의 이온 주입 에너지를 요약한 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 이온 주입 모드의 분류

이온 주입 모드는 일반적으로 표 2와 같이 3가지로 나누어 볼 수 있다. 드리프트 모드의 경우에는 장비의 한계 에너지 내에서 사용하는 것을 말하고, 감속 모드는 장비 내의 이온 주입의 반대 방향으로 이온을 끌어들이는 장치가 있어서 가능하며, 저 에너지의 경우 빔을 잡을 수가 없을 때 주로 사용한다.

표 2. 이온 주입 모드의 분류.

Table 2. Classification of ion implantation mode.

3.2 입자 분석

이온주입 전에 n형 실리콘 웨이퍼의 표면을 스캔(scan)하여 입자의 갯수를 측정한다. 표 1에 보인 새로운 공정조건에서 감속 모드와 드리프트 모드로 나누어 각각 3회씩 이온 주입하였다. 그리고 나서 이온주입 후의 입자를 측정하여 $0.2 \mu m$ 이상의 크기를 갖는 것만 그림 1에 나타내었다. 첫 번째 테스트에서 드리프트 모드는 2개, 감속 모드는 4개의 입자가 검출되었고, 두 번째 테스트에서는 어떠한 입자도 검출되지 않았으며, 세 번째 테스트에서 드리프트 모드만 1개의 입자가 분석되었다. 따라서 평균 1.33개로 100개 이하의 설정 목표 값을 충분히 만족하고 있음을 알 수 있다. 또한 감속 모드와 드리프트 모드 둘 다 매우 작은 입자 갯수를 나타내었으며 두 모드 사이의 뚜렷한 차이는 발견할 수 없었다.

그림 1. 이온 주입 후 0.2 um 이상의 입자 개수.
 Fig. 1. Particle counts above 0.2 um after ion implantation.

3.3 비파괴 검사 계수

이온주입 도즈에 따른 실리콘 격자의 손상 정도를 측정하는 비파괴검사 계수를 통해 감속 모드와 드리프트 모드의 차이를 비교하였다. 3번의 공정 테스트로 실험을 수행하여 재현성을 검증하였다. 표 1에 제시한 변형된 방법으로 이온 주입된 웨이퍼의 비파괴검사 계수와 표준 편차(%std)를 각각 그림 2에 나타내었다. 감속 모드의 비파괴검사 계수는 세 번 측정한 것 모두 918이었고, 드리프트 모드는 다소 차이를 보여 평균 912로 두 모드 사이에 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 재현성 측면에서는 감속 모드가 더 안정적인 경향을 나타내었다.

그림 2. 감속 모드와 드리프트 모드의 열 과장 실험.
 Fig. 2. Thermal wave test of deceleration mode vs. drift mode.

3.4 면 저항

감속 모드와 드리프트 모드 사이의 면저항 변화를 살펴보았다. 표 1에 보인 변경된 공정조건으로 이온 주입한 후, 면저항 값을 측정하였다. 이온 주입한 웨이퍼는 급속 열처리 공정을 진행한 후, 4탐침법(4-point probe)으로 49 point를 측정하였다. 그림 3은 감속 모드와 드리프트 모드의 면저항 값과 표준편차를 각각 나타낸 것이다. 감속 모드의 경우 평균 Rs값은 837 Ω/\square 이었고, 드리프트 모드의 경우에는 평균 면저항 값이 840 Ω/\square 로 서로 3 Ω/\square 의 차이를 보였으나, Rs 표준편차의 평균값이 0.37%로 목표 값인 0.4% 이하인 점을 감안하면 특별한 차이가 없다고 볼 수 있다. 비파괴검사 계수 데이터와 마찬가지로 감속 모드가 재현성 측면에서는 더 안정적인 데이터를 나타내었다.

그림 3. 감속 모드와 드리프트 모드의 면저항 비교.
 Fig. 3. Comparison of sheet resistance between deceleration mode and drift mode.

3.5 TRXRF 분석

빔 모드의 변화에 따른 금속의 오염농도 차이를 조사하기 위해 TRXRF 측정을 실시하였다. 분석을 실시한 금속은 K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn 등이었다. 3.2 절의 입자 분석 때와 동일한 이온 주입 조건에서 감속 모드와 드리프트 모드로 각각 나누어 이온주입 후, TRXRF를 측정하여 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 감속 모드의 경우는 Mn이 최대 0.01×10^{10} atoms/cm²가 검출되었으며, 드리프트 모드에서는 Fe가 0.01×10^{10} atoms/cm², Ni이 0.07×10^{10} atoms/cm²으로 가장 많이 검출되었으나, 두 경우 모두 5.0×10^{10} atoms/cm² 이하로 설정한 목표 값을 충분히 만족하고 있음을 알 수 있다.

그림 4. 감속 모드와 드리프트 모드의 TRXRF 데이터.

Fig. 4. TRXRF data of deceleration vs. drift mode.

3.6 SIMS 분석

감속 모드의 에너지 변동은 SIMS 분석을 통하여 검증하였다. SIMS 분석용 시료는 이상의 실험에서와 동일한 이온 주입 조건을 적용하였고, 감속 모드와 드리프트 모드의 2가지 방식을 n형 실리콘 웨이퍼에 이온 주입하여 시료를 준비하였다. 보론의 프로파일 외에도 GOI(gate oxide integration)에 영향을 미치는 Fe, Al, Na 농도도 측정하여 두 모드 사이의 차이를 비교 분석하였다.

그림 5. 감속 모드와 드리프트 모드의 보론 프로파일 비교.

Fig. 5. Comparison of Boron profile of deceleration versus drift mode.

그림 6. 감속 모드의 보론 프로파일 비교

Fig. 6. Boron profile of Deceleration mode.

그림 7. 드리프트 모드의 보론 프로파일 비교.

Fig. 7. Boron profile of drift mode.

그림 5는 감속 모드와 드리프트 모드를 사용하여 n형 웨이퍼에 이온 주입한 시료의 보론 프로파일을 비교하기 쉽게 하나의 그림에 나타낸 것이다. 또한 그림 6과 7은 보론 외에 Na, Fe, Al 원소들의 SIMS 프로파일을 각각 나타낸 것이다. 이 프로파일을 이용하여 각 원소의 농도 및 Rp 값을 표 3에 나타내었다. 모든 원소의 농도는 표면 100 Å에서부터 1800 Å 까지만 고려하였다. 처음 100 Å까지는 SIMS 분석을 하는 동안 스퍼터링 속도가 빨라 이온 도즈의 초기 변화가 큰 부분이며, 1800 Å 이상에서는 보론의 프로파일만을 고려하였다. 감속 모드에서는 전하 교환(charge exchange)으로 인한 에너지 변동이 발생하는 경우 일반적으로 두 번째

피크 또는 shoulder가 나타나게 된다. 표 3에서 보론의 이온 주입 에너지가 40 keV인 경우 Rp를 고려하여 그림5의 SIMS 프로파일에 표시한 검정 원형을 살펴보면 에너지 변동이 전혀 발견되지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서 감속 모드 적용으로 인한 에너지 변동은 없으며, 반도체 제조 라인의 이온 주입 공정에 직접 적용해도 문제없다고 판단된다. 또한 그림 6과 7에 보인 것처럼, 보론 프로파일 외에 Na, Fe, Al 원소들의 SIMS 프로파일에서 감속 모드와 드리프트 모드 사이에 뚜렷한 변화는 없었다.

표 3. 보론의 주입 범위.

Table 3. Projected range of boron.

3.7 빔 튜닝 비교

본 실험에 사용되었던 변경된 공정 조건의 빔 튜닝 시간을 비교하였다. 실제 타겟에 흐르는 빔 전류인 Ib는 ~ 475 μ A로 기존 이온 주입 공정 조건과 서로 같은 조건이었다.

그림 9. 드리프트 모드의 빔 프로파일.

Fig. 9. Beam profile of drift mode.

장비의 조건에 따라 빔 튜닝 시간이 조금씩 늘어나거나 줄어들 수 있기 때문에 빔 튜닝 시간은 2주 동안 데이터를 취합하여 최대 및 최소 값을 제외하고 평균값으로만 나타내었다. 감속 모드의 평균 빔 튜닝 시간은 13분이었고, 드리프트 모드에서의 평균 튜닝 시간은 40분이었다. 즉, 감속 모드가 드리프트 모드의 3분의 1 수준으로 매우 우수함을 알 수 있다. 또한 빔 프로파일 측면에서는 그림 8에 보인 감속 모드가 그림 9의 드리프트 모드보다 더 정상적인 빔 프로파일을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 즉, 빔 프로파일 측면에서도 감속 모드가 드리프트 모드보다 더 우수하였다.

4. 결론

높은 이온 주입 도즈와 저 에너지의 이온 주입을 수행하는 이온 주입 공정 진행에 있어서 이온 빔을 생성하는 방법 중 감속 모드의 단위공정 실험을 통해 이온 주입 공정 조건을 최적화하는 실험을 수행하여 얻은 결과는 다음과 같다. 감속 모드와 드리프트 모드로 나누어 각각 이온 주입한 후, 표면의 입자 분석, 비파괴검사 계수와 면저항(Rs), TRXRF, SIMS 분석 및 빔 튜닝 프로파일 등을 측정하였다.

그림 8. 감속 모드의 빔 프로파일.

Fig. 8. Beam profile of deceleration mode.

1. 0.2 μ m 이상의 크기를 갖는 입자 수는 평균 1.33 개로 100 이하의 설정 목표 값을 만족하였다.

2. 감속 모드와 드리프트 모드의 비파괴검사 계수와 면저항을 각각 비교한 결과, 감속 모드와 드리프트 모드의 표준편차 범위 내에서 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.
3. 감속 모드를 적용한 웨어퍼의 TRXRF 측정 결과 Mn이 0.07×10^{10} 개/cm² 검출되었으나, 설정 목표 값 $< 5.0 \times 10^{10}$ 개/cm² 이하의 목표 값을 충분히 만족하였다.
4. SIMS 분석 결과 감속 모드를 사용한 보론의 프로파일과 드리프트 모드의 프로파일이 거의 일치하였으며 에너지 변동이 없는 우수한 결과를 나타내었다.
5. 빔 튜닝 시간과 프로파일 측면에서 감속 모드가 드리프트 모드에 비해 더 우수한 특성을 나타내었다.

이상과 같이 본 논문에서 제안하는 감속모드로 변경하여 사용할 경우 종전의 높은 이온 주입 도즈와 저 에너지를 동시에 사용할 경우 나타나는 문제점들을 보완 할 수 있어 반도체 웨이퍼 칩의 제조 공정에 바로 적용 가능하다고 생각된다.

참고 문헌

- [1] E. Schroer, V. Privitera, E. Napolitani, and A. Carnera, "Transient-enhanced diffusion of boron implanted at ultra-low energies in silicon: Localization of the source", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 76, No. 21, p. 3058, 2000.
- [2] D. G. Park, H. J. Cho, I. S. Yeo, J. S. Roh, and J. M. Hwang, "Boron penetration in *p*⁺ polycrystalline-Si/Al₂O₃/Si metal oxide semiconductor system", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 77, No. 14, p. 2207, 2000.
- [3] S. M. Hogg, B. Pipeleers, A. Vantomme, and M. Swart, "Channeling of low energy heavy ions: Er in Si <111>", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 80, No. 23, p. 4363, 2002.
- [4] 김인수, 이철욱, 배인호, 최현태, 손정식, 김영일, "PICTS 방법에 의한 Boron 이온을 주입시킨 반절연성 GaAs 의 깊은 준위에 관한 연구", *전기전자재료학회논문지*, 8권, 4호, p. 426, 1995.
- [5] 윤상현, 락계달, "Retrograde Well 형성을 위한 고에너지 이온주입에 대한 연구", *전기전자재료학회논문지*, 11권, 5호, p. 358, 1998.
- [6] P. F. P. Fichtner, M. Behar, J. R. Kaschny, A. Peeva, R. Koegler, and W. Skorupa, "Copper gettering at half the projected ion range induced by low-energy channeling He implantation into silicon", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 77, No. 7, p. 972, 2000.
- [7] G. Hobler, L. Pelaz, and C. S. Rafferty, "Dose, Energy, and Ion Species Dependence of the Effective Plus Factor for Transient Enhanced Diffusion", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 147, No. 9, p. 3494, 2000.
- [8] A. J. Steckl, H. C. Mogul, and S. Mogren, "Localized fabrication of Si nanostructures by focused ion beam implantation", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 60, No. 15, p. 1833, 1992.
- [9] H. König, S. Rennon, J. P. Reithmaier, A. Forchel, J. L. Gentner and L. Goldstein, "1.55 μ m single mode lasers with complex coupled distributed feedback gratings fabricated by focused ion beam implantation", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 75, No. 11, p. 1491, 1999.
- [10] S. N. Hong, G. A. Ruggles, J. J. Paulos, J. J. Wortman, and M. C. Ozturk, "Formation of ultrashallow *p*⁻*n* junctions by low-energy boron implantation using a modified ion implanter", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 53, No. 18, p. 1741, 1988.
- [11] 정원채, "실리콘에 MeV로 이온주입된 인의 결합분포와 profile 에 관한 연구", *전기전자재료학회논문지*, 10권, 9호, p. 881, 1997.