

실리콘에서 깊은 접합의 형성을 위한 알루미늄의 확산 모델

정원채 

경기대학교 전자공학과

Diffusion Model of Aluminium for the Formation of a Deep Junction in Silicon

Won-Chae Jung

Department of Electronic Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Korea

(Received May 26, 2020; Accepted May 28, 2020)

Abstract: In this study, the physical mechanism and diffusion effects in aluminium implanted silicon was investigated. For fabricating power semiconductor devices, an aluminum implantation can be used as an emitter and a long drift region in a power diode, transistor, and thyristor. Thermal treatment with O₂ gas exhibited to a remarkably deeper profile than inert gas with N₂ in the depth of junction structure. The redistribution of aluminum implanted through via thermal annealing exhibited oxidation-enhanced diffusion in comparison with inert gas atmosphere. To investigate doping distribution for implantation and diffusion experiments, spreading resistance and secondary ion mass spectrometer tools were used for the measurements. For the deep-junction structure of these experiments, aluminum implantation and diffusion exhibited a junction depth around 20 μm for the fabrication of power silicon devices.

Keywords: Al implantation, Diffusion, Deep junction, SIMS, SR, Computer simulation

1. 서론

Aluminium 이온 주입 기술은 source로부터 에너지를 가속하여 실리콘웨이퍼에 직접적으로 주입하여서 전력용 소자인 diode, BJT (bipolar junction transistor), GTO (gate turn-off thyristor), IGBT (insulated gate bipolar transistor), DMOS (double-diffusion metal oxide semiconductor) power transistors 등을 제작하기 위해서 연구가 진행되어 왔으나 [1-8], 그럼에도 불구하고 아직도 많은 연구 데이터가 부족한 실정이다. 현재에 실리콘 직접회로 chip들과 동일한 silicon 기판 위에서 전력용 소자들을 제작할 수 있는 장점이 있다. 실리콘 기판에서 super junction 구조로

제작하면 600~700 V의 고전압 MOSFET 소자들의 제작이 가능하고 [9-12] 실리콘 기판에 알루미늄 이온 주입하여 3 kV의 blocking voltage I-V 특성을 나타내는 다이오드의 소자 [4,11]들의 제작이 가능하다. 알루미늄을 도핑하여 3 kV의 전압에서 작동하는 beveled type power thyristor와 500 V에서 작동하는 DMOS cell 구조의 high voltage power MOSFET [10,11]를 제시하고 있다 [9-12]. 다른 전력소자회로와는 다르게 실리콘 전력반도체 공정에서 Al 이온 주입 공정이 실리콘 기판을 기반으로 하는 동일한 기판에서 제작할 수 있기 때문에 집적화된 회로 chip을 더 compact하게 제작하는 데 있어서 유리하다고 사료된다. 일반적으로 실리콘에서 20 μm 의 두께를 나타내는 이미터 영역 및 드리프트 영역을 가지는 DMOS, BJT 등의 전력용 소자들은 알루미늄 이온 주입 공정을 통하여 제작이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 실리콘에 알루미늄을 이온 주입하여 도핑농도의 분포와 열처리 후에 확산된 알루미늄의 도핑농도 분포를 SIMS (secondary ion mass

✉ Won-Chae Jung; wjchung@kgu.ac.kr

Copyright ©2020 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

spectrometer), SR (spreading resistance)로 측정하고 컴퓨터시뮬레이션 tool인 SRIM [13,14]과 ICECREM [15,16]들을 이용하여 이온 주입되고 열처리된 도핑농도의 분포들을 비교 및 분석하였다. 또한 해석적인 방법을 적용하여 이온 주입분포 및 확산효과를 정확하게 나타낼 수 있는 확산 모델을 제시하였다.

2. 실험 방법

2.1 알루미늄 이온 주입 실험 및 측정 결과

이온 주입은 비저항이 250~400 Ωcm인 (111) phosphorus가 도핑된 n type 실리콘 기판에 이온 주입량 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 의 dose로 Al^+ 이온을 주입하였다. 이때 varian 이온 주입장비를 이용하여 90~150 keV의 에너지 영역에서 알루미늄 이온을 주입하였다. CAMECA 장비로 SIMS 측정은 5 keV의 에너지로 O^+ 일차이온 빔을 주사하여 Al 도핑 프로파일을 측정하였다. 그림 1~3은 90~150 keV의 에너지 영역에서 알루미늄 이온 주입 후에 실리콘에서 알루미늄 이온의 분포를 측정한 SIMS 데이터와 SRIM 및 ICECREM tool을 사용한 컴퓨터 시뮬레이션데이터를 서로 비교하여 나타내었다.

열처리 동안에 알루미늄 이온은 실리콘 표면에서 밖으로 out diffusion이 나타나는데, 이 현상을 피하기 위해서 알루미늄 이온이 주입된 실리콘에 350°C에서 PECVD (plasma enhanced chemical deposition) 방법으로 0.3 μm의 Si_3N_4 층을 cap층으로써 실리콘층 위에 증착하였다. 실리콘에서 알루미늄 이온 주입 후

에 열처리한 경우 cap층이 없는 경우라도 900°C 이하의 온도에서 열처리한 경우는 알루미늄 dose 손실이 거의 나타나지 않았다 [2]. 그러나 1,000°C 이상의 온도에서는 수% 정도의 out-diffusion에 따른 손실이 나타나게 된다. SiO_2 층은 알루미늄의 손실을 막기 위한 cap layer로써 적합하지 않다. 그 이유는 Al이 산소와 반응하여 Al_2O_3 를 형성하기 때문에 SiO_2/Si 경계면까지 Al이 도달하여 Al은 침전되고 실리콘에서 Al의 range는 실리콘표면 방향으로 shift하게 때문이다. 열처리 후에 Si_3N_4 층을 180°C의 온도조건과 85%의 인산 H_3PO_4 용액에서 분당 100~500 Å의 속도로 제거하였다. 그 후에 실리콘에 이온 주입되고 확산된 알루미늄의 농도 분포를 SR (spreading resistance) 측정방법으로 그림 4~6에 나타내고 서로 비교하였다. 그림 4는

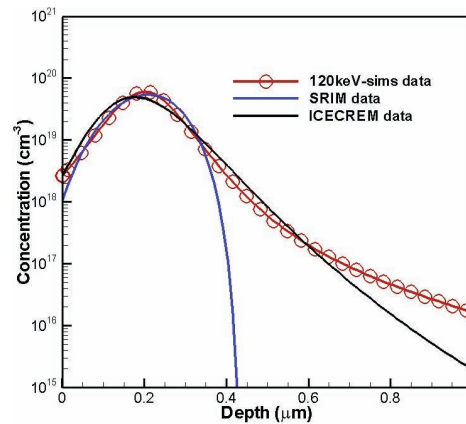


Fig. 2. Comparisons of measured SIMS data with simulated data at 120 keV.

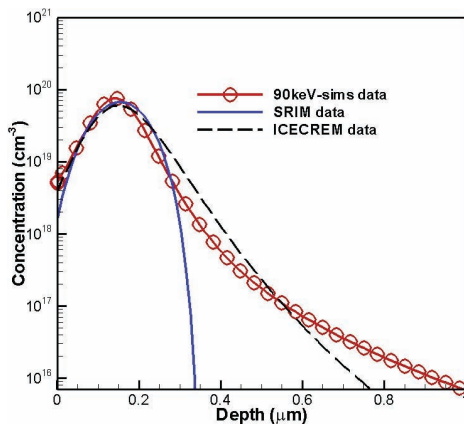


Fig. 1. Comparisons of measured SIMS data with simulated data at 90 keV.

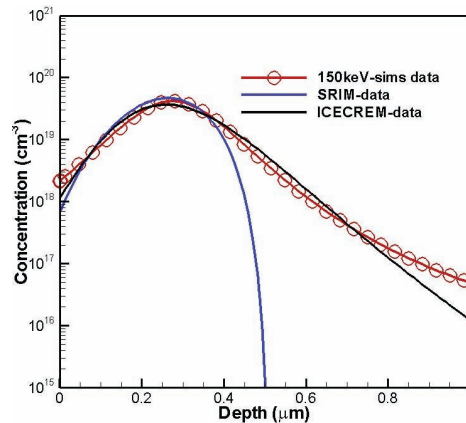


Fig. 3. Comparisons of measured SIMS data with simulated data at 150 keV.

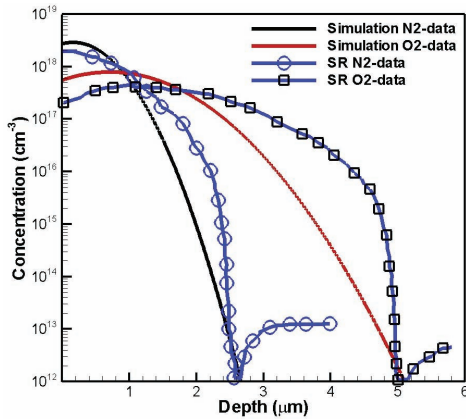


Fig. 4. Comparisons with SR and simulation data under inert and oxidation annealing at 900°C for 16 hours.

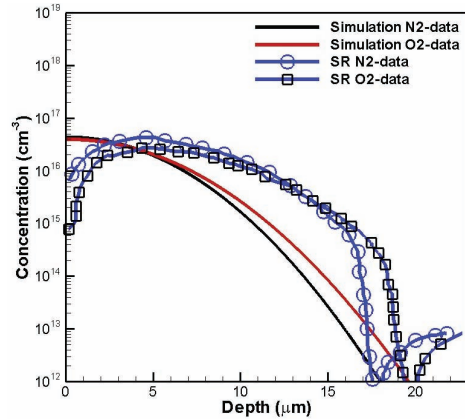


Fig. 6. Comparisons with SR and simulation data under inert and oxidation annealing at 1,100°C for 16 hours.

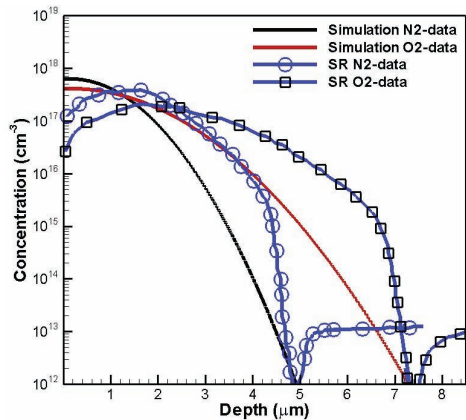


Fig. 5. Comparisons with SR and simulation data under inert and oxidation annealing at 1,000°C for 16 hours.

900°C에서 확산된 알루미늄의 측정된 SR 프로파일과 시뮬레이션 결과들을 서로 비교하였다. 또한 p-n 접합 깊이는 N₂ 분위기에서 2.56 μm, O₂ 분위기에서 4.96 μm를 각각 나타내었다.

그림 5는 1,000°C에서 확산된 알루미늄의 측정된 SR 프로파일과 시뮬레이션 결과들을 서로 비교하였다. 1,000°C에서 p-n 접합 깊이는 N₂ 분위기에서 4.86 μm, O₂ 분위기에서 7.51 μm를 각각 나타내었다.

그림 6은 1,100°C에서 확산된 알루미늄의 측정된 SR 프로파일과 시뮬레이션 결과들을 서로 비교하여 나타낸 결과이다. 장시간의 고온 확산조건인 1,100°C에서 p-n 접합 깊이는 N₂ 분위기에서 17.5 μm, O₂ 분위기에서 19.3 μm로 각각 나타났다. 이 깊이의 분포는 거의 20 μm까지 drift 영역을 형성할 수가 있기에 본

실험 및 이론적인 분석시도는 power device의 제작을 가능하게 할 수 있는 도핑 프로파일 구조를 위한 해석적인 확산 모델을 제시할 수 있다고 사료된다.

2.2 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 물리적인 range parameter의 계산

그림 7은 1 keV에서 10 MeV의 에너지 영역에 대한 전자 및 핵정지력을 SRIM 시뮬레이션 데이터로부터 나타내었다. S_n (핵정지력)의 최대치는 에너지 13 keV에서 36.4 eV/Å를 나타내고 있다. 반면에 전자 정지력은 10 MeV에서도 지속적으로 증가하는 형태를 나타내고 있다. 에너지 10 MeV에서 273.1 eV/Å를 나타내고 있다. 반면에 이온 주입 동안에 실리콘 기판에서 알루미늄 이온의 recoiling 효과는 낮은 이온 주입량에서는 거의 나타나지 않는다. 왜냐하면 알루미늄 이온은 질량이 27이고 실리콘 기판의 28 amu.보다 다소 더 작고 가볍기 때문이다.

T-dynamic [17,18]의 컴퓨터시뮬레이션을 통하여 1×10¹⁵ cm⁻²의 dose에서 이온빔 입사각도가 7°인 경우에 sputtering yield [18]는 에너지가 90 keV에서 0.87, 120 keV에서는 0.74, 그리고 150 keV에서는 0.64로 각각 나타난 결과로부터 알루미늄 이온의 sputtering yield는 70 keV 이상의 이온 주입 에너지 경우는 1.0 이하의 값을 나타내었다. 따라서 실리콘에서 전력용 소자 제작을 위해서 long drift 영역과 깊은 이미터 영역의 형성을 위한 알루미늄 이온 주입의 경우 sputtering 효과는 거의 무시해도 된다.

이온 주입 후에 전체 침투 깊이는 식 (1)과 같이 나

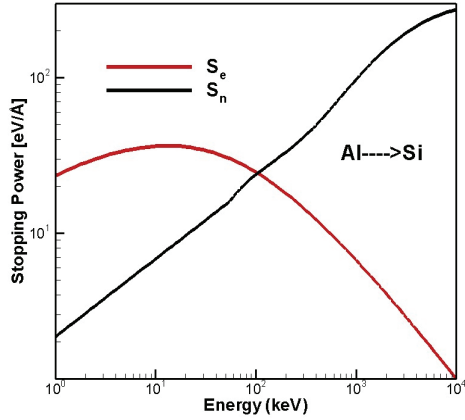


Fig. 7. Electronic and nuclear stopping power in aluminium implanted silicon.

타낼 수가 있다.

$$R_{tot} = \int_0^{E_0} \frac{dE}{(S_e + S_n)} \quad (\text{Å}) \quad (1)$$

R_p (projected average range) 값은 식 (2)와 같이 나타낼 수가 있다.

$$\frac{R_{tot}}{R_p} = \left(1 + k \frac{M_2}{M_1}\right) \quad (2)$$

알루미늄 이온이 실리콘에 90 keV, 120 keV 및 150 keV로 이온 주입한 경우는 k 값이 0.204, 0.301 및 0.124로 각각 나타났다. ΔR_p (standard deviation of vertical direction)는 해석적인 방법으로부터 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k' \Delta R_p = 1.1 R_p \times \frac{2(M_1 \times M_2)^{1/2}}{(M_1 + M_2)} \quad (3)$$

알루미늄 이온이 실리콘에 90 keV, 120 keV 및 150 keV로 이온 주입한 경우는 k' 값이 2.29, 2.36 및 2.6으로 각각 나타났다.

세 번째 모멘트인 γ (skewness)는 다음의 식 (4)로 구할 수 있었다.

$$\gamma = (R_p - X_p) \times \frac{k'' \Delta R_p}{R_p} \quad (4)$$

Table 1. Range parameters extracted from 90 keV to 150 keV energy in aluminium implanted silicon.

	E keV	R_p (μm)	ΔR_p (μm)	γ	β
SIMS	90	0.162	0.078	0.61	5.75
	120	0.197	0.092	0.72	5.14
	150	0.28	0.12	0.57	4.33
SRIM	90	0.153	0.057	-0.055	2.64
	120	0.218	0.07	-0.163	2.71
	150	0.252	0.083	-0.24	2.77
ICE- CREM	90	0.139	0.073	0.95	9.29
	120	0.2	0.089	0.68	7.24
	150	0.276	0.121	0.4	4.86

여기서 X_p 는 peak 농도를 나타내는 위치 값이고 가우스 분포($\gamma=0$)가 아닌 tail이 있는 pearson IV 분포의 경우에, $0 < \gamma^2 < 32$ 의 영역에 들어 있는 γ 의 값을 나타내고 있다. 알루미늄 이온이 실리콘에 90 keV, 120 keV 및 150 keV로 이온 주입한 경우는 k'' 값이 86.8, 256.9 및 233.3으로 각각 나타났다.

네 번째 모멘트인 β (kurtosis)는 profile의 뾰족하거나 평탄한 정도를 나타내는 경사도의 척도이다. β 의 값은 pearson IV의 분포를 적용하여 식 (5)에 나타내었다.

$$\beta > \frac{39\gamma^2 + 48 + 6(\gamma^2 + 4)^{1.5}}{32 - \gamma^2} = \lambda \quad (5)$$

실제로 구한 β 값은 $\beta = k'' \lambda$ 값을 적용하였다.

알루미늄 이온이 실리콘에 90 keV, 120 keV 및 150 keV로 이온 주입한 경우는 k'' 값이 2.54, 1.29 및 3.62로 각각 나타났다. 알루미늄의 range parameters를 표 1에 나타내었다.

표 1에서 나타난 결과에서처럼 SRIM 컴퓨터시뮬레이션 결과에서 ΔR_p 의 값이 전반적으로 크기 때문에 그림 1~3에 나타난 프로파일의 분포가 넓게 나타나고 있다. 그러나 비정질 실리콘 기판에서의 결과이기 때문에 channeling 효과가 나타나지 않기에 프로파일의 tail 부분에서 가파르게 떨어지는 형태를 나타내고 있다. 반면에 측정된 SIMS 데이터와 ICECREM 컴퓨터 시뮬레이션 데이터는 완만히 감소하고 길게 늘어진 channeling tail 부분을 나타내고 있다. 또한 SRIM 시뮬레이션의 결과에서 γ (skewness)는 무게중심의 위치가 peak 농도 값의 다소 왼쪽 편에 위치하기에

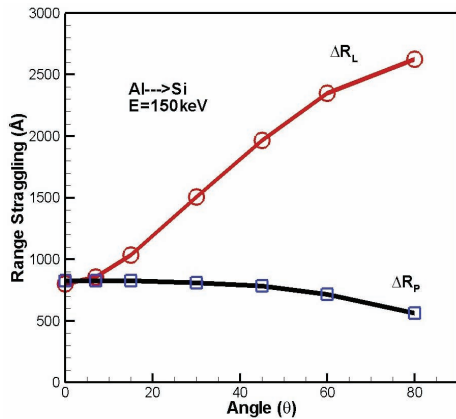


Fig. 8. Range straggling in comparison with vertical and lateral standard deviations from different angles of incidence.

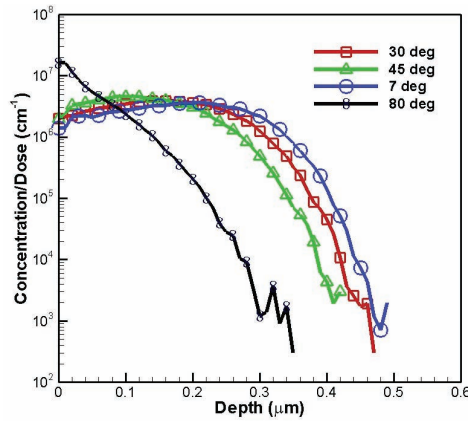


Fig. 9. Defect distributions in aluminium implanted silicon from different incident angles at 150 keV.

음의 값을 나타내고 있다. 그러나 일반적인 $\gamma=0$ 와 $\beta=3$ 의 값을 가지는 gauss 분포와 유사한 값을 나타내고 있다. 그림 8은 SRIM 시뮬레이션을 통하여 알루미늄 이온이 실리콘에 이온 주입 후에 입사각도에 따른 수직 및 측면방향으로의 표준편차를 서로 비교하여 그림으로 나타내었다. 그림 8에서 제시한 것처럼 이온빔의 입사각도가 증가함에 따라서 수직방향보다는 측면방향으로 이온이 더 깊이 퍼짐을 확인할 수가 있다.

SRIM 시뮬레이션을 통하여 이온당 생성된 vacancies 수는 1,670이 됨을 확인하였다. 7°와 30°, 45° 및 80°의 입사각도에 따른 알루미늄 이온 주입 후에 Monte Carlo 프로그램인 SRIM 시뮬레이션을 실행하여 나타난 결함분포를 제시하기 위해서 실리콘 기판에서 생성된 vacancies의 분포를 그림 9에 나타내었다. 입사각도가 커짐에 따라서 침투 깊이가 점점 얇은 분포를 나

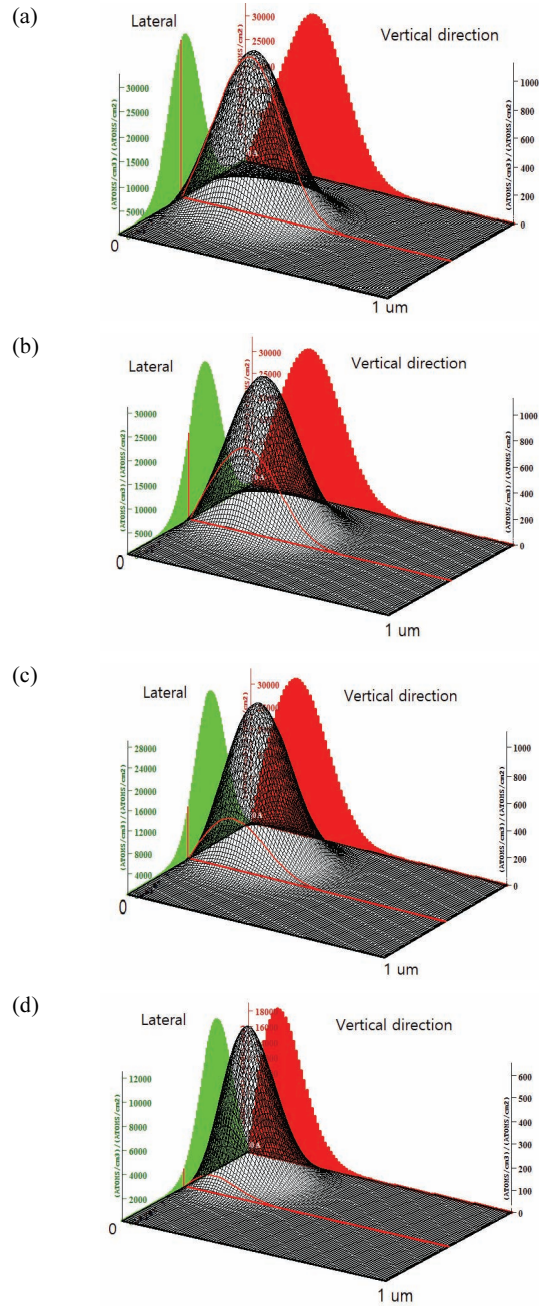


Fig. 10. Three-dimensional profiles in aluminium implanted silicon from different incident angles at 150 keV.

타내고 80°인 경우에는 거의 표면 부근에서 결함분포의 최대치를 나타내고 있고 dopant의 침투 깊이도 가장 짧은 분포를 나타내었다. 따라서 7°에서 80°까지 서로 다른 이온 주입 입사각도에 따른 손상(damage) 영역의 분포를 그림 9에 나타내었다.

그림 10은 에너지 150 keV로 알루미늄 이온이 실리

콘에 서로 다른 입사각도 즉 (a) 7°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 80°로 이온 주입 후에 이온의 농도 분포를 규격화된 값으로 3d (three-dimensional)로 나타내고 있다. 그림 10에서 3d의 회전각도 및 경사각도는 122° 및 22°로 동일한 조건에서 이온의 분포를 나타내었다. Good statistics를 위해서 컴퓨터시뮬레이션에 적용한 이온의 개수는 100,000이다. 이온의 개수가 적으면 컴퓨터 그래픽의 resolution이 현저히 떨어지기 때문이다.

열처리 동안에 질소가스 분위기에서보다도 산소가스 분위기에서 정확한 알루미늄의 확산계수를 구하기는 어렵다. Inert gas인 N₂ 분위기에서 실리콘에서 알루미늄의 확산계수는 온도가 800°C에서 4.1×10⁻¹⁶, 900°C에서는 1×10⁻¹⁴, 1,000°C에서는 7.4×10⁻¹⁴, 1,100°C에서는 7.48×10⁻¹³의 값을 각각 나타내었다. 이때에 적용된 치수는 cm²/s로 나타내었다. 여기서 적용된 확산계수는 식 (6)과 같다.

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_A}{kT}\right) \quad (6)$$

여기서 D₀는 8.0 cm²/s, E_A는 3.47 eV를 적용하였다. 800°C에서 1,100°C 사이에 확산계수의 증가는 800°C에서의 확산계수를 기준했을 때보다 900°C에서는 24.4배, 1,000°C에서는 180.5배, 1,100°C에서는 1,824배로 매우 큰 값으로 빠르게 확산함을 알 수 있다. 질소가스 분위기와는 다른 산소가스 분위기에서 열처리 후에 SR 방법으로 측정된 data를 서로 비교해 본 결과, 질소가스 분위기에서보다 산소가스 분위기에서 더 깊이 확산하는 OED 효과가 나타남을 확인하였다. 열처리 후에 ICECREM 컴퓨터 시뮬레이션에서 나타난 결과는 실험 데이터인 SR 측정데이터와 일치하지 않고 너무나 큰 차이를 나타내어서 정확한 확산현상을 규명하는 데 있어서 실제로 적용할 수 없었다. 따라서 이온 주입된 SIMS 데이터를 확산방정식 즉 식 (7)에 적용한 결과들을 그림 4~6에 나타내었다.

$$C(x,t) = \frac{N_{dose}}{\sqrt{2\pi(\Delta R_p^2 + 2Dt)}} \times \exp\left[\frac{-(x - R_p)^2}{2(\Delta R_p^2 + 2Dt)}\right] \quad (7)$$

여기서 N_{dose}는 알루미늄 이온의 주입량(dose)이고 D는 확산계수를 각각 나타내고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 알루미늄 장시간 열처리 및 측정 결과

Deep junction 구조의 power device 제작을 위해서 실리콘 기판에서 수십 μm까지의 p 영역을 구현하기 위해서 알루미늄 이온 주입 후에 16 hrs의 장시간(long time) 확산에 의한 농도 분포를 기존의 컴퓨터시뮬레이션 tool을 적용하여 본 결과 실험 데이터와 큰 차이를 나타내고 전혀 일치하지 않는 결과를 나타내었다. 따라서 식 (7)을 적용한 해석적인 방법을 적용한 정확한 확산 모델을 제시하는 simulation tool이 현재는 필요한 실정이다. 따라서 알루미늄 이온 주입 후에 N₂ 및 dry O₂ 가스 분위기에서 열처리 후에 SR로 실제로 측정된 데이터와 SIMS 데이터를 식 (7)에 적용하여 계산된 확산 data를 서로 비교하여 그림 4~6에 나타내었다. 기판의 다수 캐리어 농도가 1×10¹³ cm⁻³인 기준 농도에서 p-n 접합 깊이는 서로 잘 일치하지만 중간 영역에서 우측으로 더 볼록하게 확장된 확산효과는 이론상 계산한 결과로는 잘 일치시킬 수가 없었다. 이에 대한 이유는 900°C 이상의 고온에서 16시간의 매우 긴 장시간 확산 동안에 실리콘 기판의 팽창 및 열적인 스트레스에 기인한 것으로 사료된다.

3.2 알루미늄 확산 모델 및 fitting curve

그림 4~6으로부터 실리콘에서 알루미늄의 확산계수를 구하는 방법은 inert 또는 산소 분위기에서 열처리한 조건에 따라서 SR 실험 데이터를 근거로 해서 독자적으로 계산한 확산계수들을 표 2와 식 (8)~(11)에 나타내었다. Fuller와 Ditzenberger가 제안한 확산 모델 [1]은 단지 N₂ 분위기에서 열처리한 데이터뿐인데 SR실험 데이터와 비교해 본 결과 900°C에서 1.82배, 1,000°C에서 2.03배, 1,100°C 온도에서 1.72배의 차이로 실험 data보다 작은 값들로 나타났다. 그리고 O₂ 분위기에서 열처리한 경우의 확산계수는 잘 알려지지 않고 많은 논문에서 inert 분위기에서 열처리한 조건의 결과가 대다수이고 산화 분위기에서 열처리한 경우의 결과는 거의 없는 실정이다. SR 데이터와 잘 일치하는 확산 모델을 적용하여 산화 분위기에서 열처리한 경우의 결과를 처음으로 표 2에 제시하였다.

표 2의 값에서 900~1,100°C 온도구간에 따라서 세분화하여 두 개의 선형방정식을 적용한 수식들로 실험 data와 계산 값이 완벽하게 일치하는 방정식들을 구할

Table 2. Diffusion coefficients of aluminium implanted under N₂ and O₂ annealing for 16 hours.

Model	Diffusion coefficient of aluminium (cm ² /s)		
	900°C	1,000°C	1,100°C
Fuller (N ₂)	1×10 ⁻¹⁴	7.4×10 ⁻¹⁴	7.48×10 ⁻¹³
Analytical diffusion model (N ₂ and O ₂ annealing)			
N ₂ -model	1.82×10 ⁻¹⁴	1.5×10 ⁻¹³	1.29×10 ⁻¹²
O ₂ -model	6.15×10 ⁻¹⁴	1.71×10 ⁻¹³	1.55×10 ⁻¹²

수가 있었다. 먼저 N₂ 확산 모델인 경우에 두 구간으로 나누어서 900~1,000°C의 영역에서는 식 (8)로 나타내고 1,000~1,100°C의 영역에서는 식 (9)로 각각 나타내었다.

$$D[\text{cm}^2/\text{s}] = (-116.8 + 0.1318 T) \times 10^{-14} \quad (8)$$

$$D[\text{cm}^2/\text{s}] = (-1125 + 1.14 T) \times 10^{-14} \quad (9)$$

건식산화공정으로 O₂ 확산 모델인 경우에 두 구간으로 나누어서 900~1,000°C의 영역에서는 식 (10)으로 나타내고 1,000~1,100°C의 영역에서는 식 (11)로 각각 나타내었다.

$$D[\text{cm}^2/\text{s}] = (-92.4 + 0.1095 T) \times 10^{-14} \quad (10)$$

$$D[\text{cm}^2/\text{s}] = (-1361.9 + 1.379 T) \times 10^{-14} \quad (11)$$

4. 결론

이온 주입기술을 적용하여 deep junction 구조를 제작하였고 매우 깊은 접합구조에서 SR 측정방법으로 농도 분포를 측정하였다. 알루미늄의 정확한 확산 모델을 확립하기 위해서 900°C에서 1,100°C 사이의 고온조건에서 확산계수를 구하기 위해서 해석적인 방법을 적용하여 SR로 측정된 실험 데이터와 매우 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 기존에 C. S. Fuller와 J. A. Ditzenberger의 논문에서 확산계수보다 본 논문의 이론적인 계산 결과에서는 900°C에서 1.82배, 1,000°C에서 2.03배, 1,100°C에서 1.72배의 차이로 더 크게 나타났다. 본 연구에서 제시한 해석인 모델이 C. S. Fuller와 J. A. Ditzenberger의 데이터보다 실험 데이터에 더 잘 일치하는 결과를 나타내었다. 온도 900~1,100°C

영역에서 fitting curve 방정식을 적용하여 이 구간에서 매우 정확한 확산계수 값을 구할 수 있는 수식들을 식 (8)~(11)에 제시하였다. 발표된 많은 연구 결과가 주로 N₂ 확산 모델인 경우에 반해서 O₂ 확산 모델은 거의 알려지지 않고 있는데, 본 연구에서는 900~1,100°C 온도 영역에서 dry O₂ 확산조건에서 확산계수 값들을 처음으로 제시하였다. 또한 O₂/N₂ 가스 분위기에서 열처리한 경우에 확산계수의 비는 900°C에서 3.38배, 1,000°C에서 1.14배, 1,100°C에서 1.2배의 차이로 각각 나타났다. 이온 주입된 알루미늄 이온들은 열처리 후에 OED 효과가 나타남을 그림 4~6에서 확인할 수 있었다. 고전압 실리콘 반도체소자구조에서 수십~100 μm의 drift 확산층 제작을 위한 이온 주입 및 확산공정기술에 본 연구의 해석적인 확산 모델과 실험 데이터가 다양하게 적용되리라 사료된다.

ORCID

Won Chae Jung

<https://orcid.org/0000-0001-9133-525x>

REFERENCES

- [1] C. S. Fuller and J. A. Ditzenberger, *J. Appl. Phys.*, **27**, 544 (1956). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1722419>]
- [2] G. Galvagno, F. La Via, F. Priolo, and E. Rimini, *Semicond. Sci. Technol.*, **8**, 488 (1993). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0268-1242/8/4/002>]
- [3] Z. Yang, H. Du, and S. P. Withrow, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **354**, 207 (1994). [DOI: <https://doi.org/10.1557/PROC-354-207>]
- [4] E. Halder, P. Roggwiler, and J. Gobrecht, *Phys. Scr.*, **39**, 406 (1989). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0031-8949/39/3/030>]
- [5] Ch. Ortiz, D. Mathiot, Ch. Dubois, and R. Jérision, *J. Appl. Phys.*, **87**, 2661 (2000). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.372236>]
- [6] O. Krause, H. Ryssel, and P. Pichler, *J. Appl. Phys.*, **91**, 5645 (2002). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1465501>]
- [7] H. G. Francois-Saint-Cyr, F. A. Stevie, J. M. McKinley, K. Elshot, L. Chow, and K. A. Richardson, *J. Appl. Phys.*, **94**, 7433 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1624487>]
- [8] A. G. Kesavev, V. V. Kondratyev, and I. L. Lomaev, *Phys. Met. Metallogr.*, **119**, 1101 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1134/S0031918X18110078>]
- [9] Infineon Tec. AG., Power MOSFET, <http://www.infineon.com> (2012).
- [10] B. J. Baliga, *Power Semiconductor Devices* (Tomson Information Publishing, Belmont, 1996) p. 375.

- [11] J. Lutz, H. Schlangenotto, U. Scheuermann, and R. De Doncker, *Semiconductor Power Devices, 2nd Edition* (Springer International Publishing, New York, 2018) p. 257. [DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70917-8>]
- [12] B. J. Baliga, *Fundamentals of Power Semiconductor Devices, 2nd Edition* (Springer International Publishing, New York, 2018) p. 89. [DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93988-9_3]
- [13] J. F. Ziegler and J. P. Biersack, *The Stopping and Range of Ions in Matter* (Pergamon, New York, 1985) p. 93. [DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8103-1_3]
- [14] J. F. Ziegler, *SRIM 2013 Manual*, <http://www.srim.org/> (2013).
- [15] H. Ryssel, J. Lorenz, and W. Krüger, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, **19**, 45 (1987). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(87\)80012-5](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(87)80012-5)]
- [16] Fraunhofer-Gesellschaft, User's Guide 4.2, ICECREM Manual (2000).
- [17] W. Möller and W. Eckstein, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, **2**, 814 (1984). [DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(84\)90321-5](https://doi.org/10.1016/0168-583X(84)90321-5)]
- [18] W. Eckstein, *Computer Simulation of Ion-Solid Interactions* (Springer, Berlin, 1991) p. 169. [DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-73513-4>]