

REPORT



제목 : 반도체 공정 Assignment 3

수강과목 : 반도체 공정

담당교수 : 이성식 교수님

학 과 : 전기전자컴퓨터공학과 전자공학전공

학 번 : 201993160

이 름 : 이세형

제출일자 : 2019.11.10

Problem 4-1: Derive the time-space dependent differential equation (Fick's second law) of diffusion from the Fick's first law and the continuity equation.

Fick's first law: $J = -D \frac{\partial N}{\partial x}$; Continuity equation: $\frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x}$ (N은 불순물의 농도 [#/cm³], J는 particle flux [#/cm²·s], D는 Diffusion coefficient [cm²/s])

Fick's first law의 양변을 거리 x에 대해서 미분하면,

$$\frac{\partial J}{\partial x} = -D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}$$

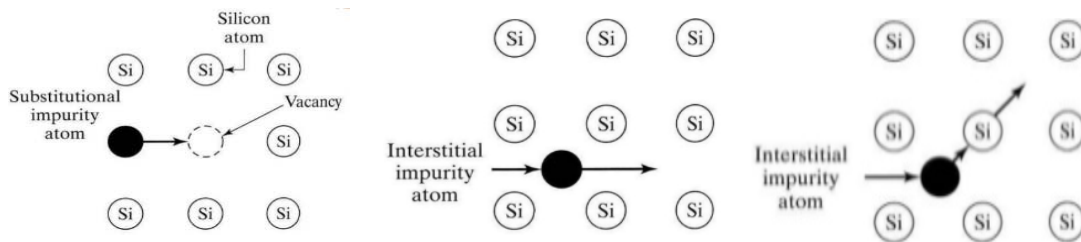
이 식에 continuity equation을 적용하면,

$$-\frac{\partial J}{\partial x} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} = \frac{\partial N}{\partial t}$$

결론적으로 time-space dependent differential equation 인

Fick's second law: $\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}$ 가 유도되었다.

Problem 4-2: Explain about the two independent mechanisms of diffusion.



900~1200°C의 고온에서 불순물 원자들이 실리콘의 표면에서 결정 속으로 이동하며 나타나는 확산 메커니즘(Diffusion mechanism)은 치환형 확산(Substitutional diffusion)과 침입형 확산(Interstitial diffusion)으로 크게 두 가지로 구분된다.

첫 번째로 치환형 확산(substitutional diffusion)은 기존의 실리콘 격자 내의 원자 자리의 공극(Vacancy)을 불순물 원자가 차지함으로써 ‘치환’하는 확산이다. 이를 위해서는 격자 내에 반드시 공극이 존재해야하며, 통계적으로 특정한 수의 공극이 격자 내에 반드시 존재한다. 대표적인 치환형 확산물질로는 B(Boron), P(Phosphorous) 가 있다.

두 번째인 침입형 확산(Interstitial diffusion)은 고온에서 공극은 정상적인 격자 위치에 있던 실리콘 원자가 격자 간 공간으로 ‘침입’한 불순물 원자에 의해서 이동하게 되고, 불순물 원자가 이 실리콘 원자의 자리를 치환하면서 발생하는 확산이다. 이러한 메커니즘은 공극의 존재가 필요하지 않으므로, 침입형 확산이 치환형 확산보다 훨씬 더 빠르며, 따라서 조절하기 어렵다. 대표적인 침입형 확산물질로는 Li, Cu, Fe, Au와 같은 Transition Metal들이 있다.

Problem 4-3: Describe the constant-source diffusion and the limited-source diffusion showing respective mathematical expressions of dopant density as a function of time and space.

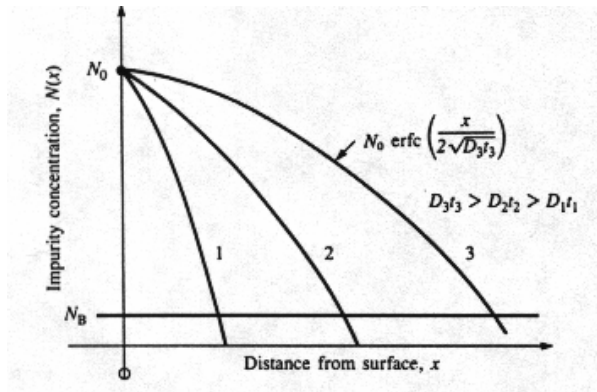
1. Constant-source diffusion

Constant-source diffusion에서 불순물 농도는 웨이퍼 표면에서 일정한 값으로 공급된다고 가정하여 Fick's second law 식의 해를 구하면, 표면으로부터 거리와 확산 시간에 대한 불순물 농도 $N(x,t)$ 는 상보에러함수(erfc)의 형태로 해가 구해진다. 이때,

$$N(x,t) = N_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

(N_0 는 웨이퍼 표면의 불순물 농도[#/cm³], D 는 diffusion coefficient[cm²/s])

이때, 확산계수 D 는 공정온도 T 에 의해 결정되기 때문에, 실리콘 표면으로부터 거리 x 에 위치한 불순물의 농도 N 은 공정시간 t 와 공정 온도 T 에 의해 결정된다.



또한, 공급해주는 Total Dose Q [# /cm²] 는 Impurity concentration $N(x)$ 를 Distance from surface x 에 대해 적분해준 값과 같다. 이는 아래의 수식으로 나타낼 수 있다.

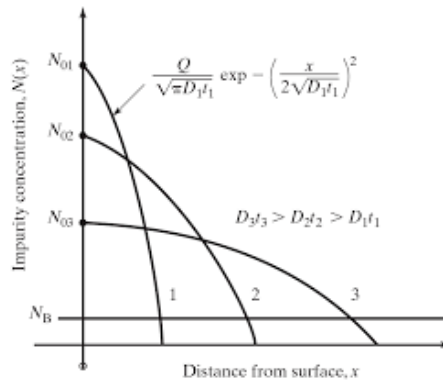
$$Q = \int_0^{\infty} N(x,t) dx = 2N_0 \sqrt{\frac{Dt}{x}}$$

2. Limited-source diffusion

Limited-source diffusion에서는 지속적으로 불순물을 공급하는 것이 아니라 실리콘 표면에서 Total dose Q 만큼의 불순물을 임펄스의 형태로 공급한다고 가정하여 Fick's second law 식의 해를 구하면, 표면으로부터 거리와 확산 시간에 대한 불순물 농도 $N(x,t)$ 는 가우시안함수의 형태로 해가 구해진다.

$$N(x,t) = \left(\frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

이때, 공급해주는 총 Dose량 Q 가 상수이므로 공정시간과 공정온도에 따라 표면에서의 불순물 농도와 Junction depth는 변하지만, 표면으로부터 거리에 대해 불순물 농도를 적분한 값은 일정하다. 또한, 공급량은 제한적인 상황에서 지속적으로 확산이 이루어지고 있어 표면의 농도는 Junction depth가 커질수록 점차 줄어드는 경향을 보인다.

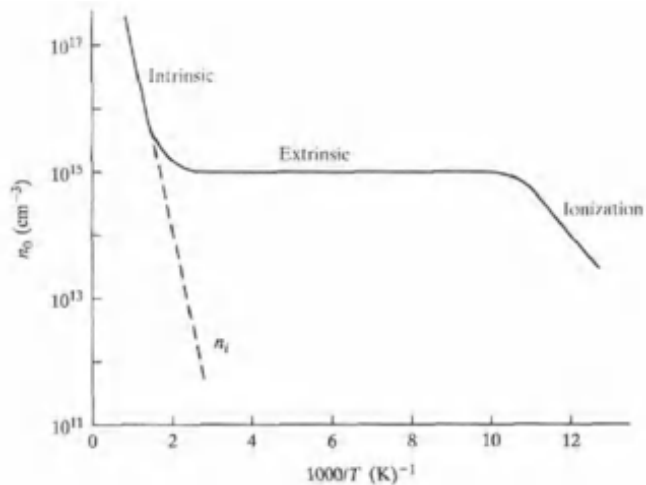
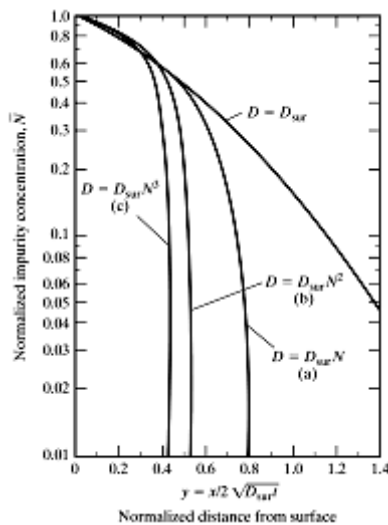


Problem 4-4: Explain the two step diffusion in terms of pre-deposition and drive-in processes.

Two step diffusion은 pre-deposition 단계에서 Total dose Q 를 정한 뒤, drive-in 단계에서 제한적 확산을 하는 방식이다. pre-deposition 단계에서는 constant-source diffusion mechanism을 따르며, 상보에러함수(erfc)의 형태로 불순물 농도 $N(x,t)$ 가 결정되기 때문에 $Q = \int_0^\infty N(x,t)dx = 2N_0\sqrt{\frac{Dt}{\pi}}$ 를 통해 Total dose를 구할 수 있다. 이어지는 drive-in 단계에서는 Limited-source diffusion mechanism을 따르며, 가우시안함수의 형태로 불순물 농도 $N(x,t) = \left(\frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}}\right)\exp\left(-\frac{x^2}{2Dt}\right)$ 가 결정된다. 이때, 초기 Total dose Q 는 앞서 구한 값이고, 공정온도 T 에 따라 확산계수 D 가 결정되고, 이 값과 함께 공정시간 t 에 의해 표면 불순물 농도 N_0 와 Junction depth x_j 가 결정된다.

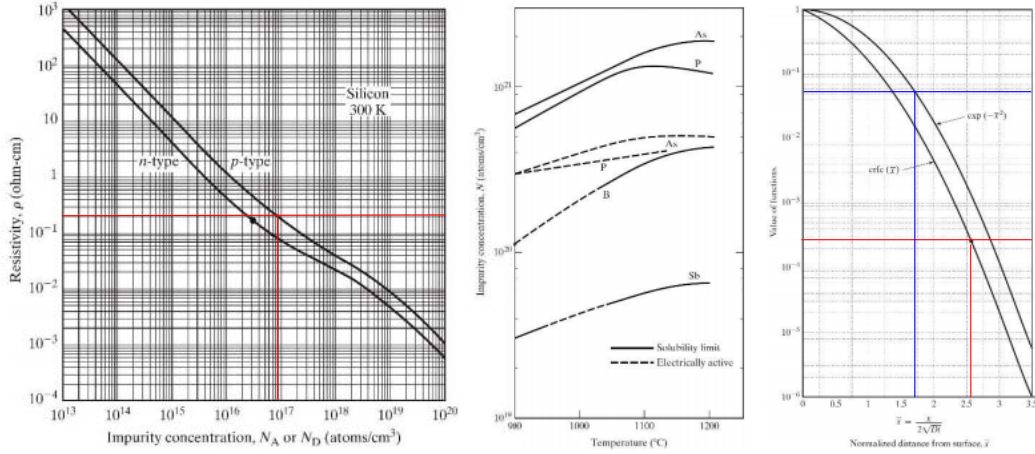
Problem 4-5: Explain the background doping concentration-dependent diffusion in terms of relative dominance between the dopant concentration and the intrinsic concentration at diffusion temperature.

일반적으로 확산 공정은 $900\sim 1200^\circ\text{C}$ 의 고온에서 진행되기 때문에 Intrinsic concentration n_i 가 Background doping concentration N_B 보다 큰 값을 가지게 되고, 이러한 경우에 아래의 좌측 그래프에서처럼 확산계수 D 가 농도에 의존적이 되게 된다. 표면에서는 불순물의 농도가 상대적으로 크기 때문에 확산계수 D 가 큰 값을 가지지만, 내부로 들어갈수록 n_i 값이 크기 때문에 확산계수 D 가 크게 감소하게 된다. 이러한 농도에 따른 확산방정식은 선형, 곡선형, 그리고 3차 곡선형으로 의존하는 확산계수 $D = D(x)$ 로 나타낼 수 있다.



Problem 4-6: A phosphorus diffusion is used to form the base region of an NPN BJT in a $0.2 \Omega\text{-cm}$ p-type silicon wafer. A solid-solubility-limited phosphorus pre-deposition is performed at 900°C for 20 min followed by a 5-hr drive-in at 1100°C . Find the surface concentration and junction depth (a) after the pre-deposition step and (b) after the drive-in step using the Table and Figures below:

Element	D_0 (cm ² /sec)	E_A (eV)
B	10.5	3.69
Al	8.00	3.47
Ga	3.60	3.51
In	16.5	3.90
P	10.5	3.69
As	0.32	3.56
Sb	5.60	3.95



(a) 비저항 $\rho = 0.2 \Omega\text{cm}$ 인 p-type silicon wafer 의 Background doping concentration $N_B = 9 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 이다. 고용도 제한을 넘어서는 양의 인을 공급했으므로 $N_0 = 3 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 이고 $N(x) = 3 \times 10^{20} \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}}\right) \text{cm}^{-3}$ 가 된다. $N_B = N(x)$ 를 만족하는 x 가 junction depth x_j 이다. $\bar{x} = \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}}$ 라고 두고 $9 \times 10^{16} = 3 \times 10^{20} \text{erfc}(\bar{x})$ 를 만족하는 $\text{erfc}(\bar{x})$ 를 구하면, $\text{erfc}(\bar{x}) = 3 \times 10^{-4}$ 이다. 우측의 그래프를 통해 확인되는 $\bar{x} = 2.57$ 이다. 이때 $D_1 = 10.5 \exp\left(-\frac{3.69}{8.614 \times 10^{-5} \times 1173}\right) = 1.45 \times 10^{-15} \text{cm}^2/\text{s}$ 이고 $t_1 = 1200\text{s}$ 이므로 계산하면 junction depth $x_j = 2 \times \sqrt{D_1 t_1} \times 2.57 = 6.78 \times 10^{-6} \text{cm} = 0.0678 \mu\text{m}$ 이다.

(b) 계산하면 $Q = 2 \times N_0 \sqrt{\frac{D_1 t_1}{\pi}} = 2 \times 3 \times 10^{20} \times \sqrt{\frac{1.45 \times 10^{-15} \times 1200}{\pi}} = 4.47 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$, $D_2 = D_0 \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right) = 10.5 \times \exp\left(-\frac{3.69}{8.614 \times 10^{-5} \times 1373}\right) = 2.96 \times 10^{-13} \text{cm}^2/\text{s}$, $t_2 = 18000\text{s}$ 이다. $N(x) = \left(\frac{Q}{\sqrt{\pi D_2 t_2}}\right) \exp\left(-\left(\frac{x}{2\sqrt{D_2 t_2}}\right)^2\right) = (3.46 \times 10^{18}) \exp\left(-\left(\frac{\bar{x}}{2}\right)^2\right) \text{cm}^{-3}$ 이고 $N_B = N(x)$ 를 만족하는 x 가 junction depth x_j 이다. $\exp\left(-\left(\frac{\bar{x}}{2}\right)^2\right) = (9 \times 10^{16}) / (3.46 \times 10^{18}) = 2.6 \times 10^{-2}$ 이고 그래프를 통해 확인되는 $\bar{x} = 1.8$ 이다. 이를 만족하는 junction depth $x_j = 2.63 \mu\text{m}$ 이다. (또한, $D_1 t_1 = 1.74 \times 10^{-12}$ 이고 $D_2 t_2 = 5.33 \times 10^{-9}$ 로 $D_1 t_1 \ll D_2 t_2$ 를 만족하므로 가우스 분포로 계산을 하는 것이 적합하다.)

Problem 4-7: Explain the relationship between Sheet resistance and junction depth with calculating Sheet resistances of cases of (a) and (b) of **Problem 4-6**. Also, check graphically with the **Irvin's curves** shown in **Figures 4.16 (c) and (d)**.

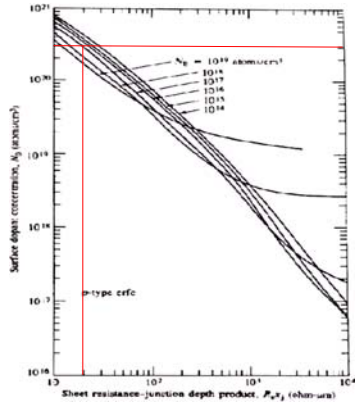


Figure 4.16 (c)

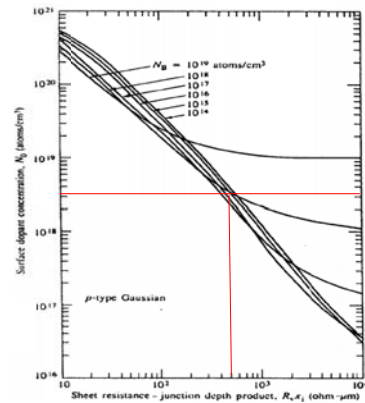


Figure 4.16 (d)

문제 4-6 (a) 와 (b)에서 시트 저항 $R_s = \frac{\rho}{x_j}$ 식을 통해서 값을 구하면, (a)의 경우에는 Figure 4.8에서 불순물 농도 $N_{01} = 3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 일 때, 비저항 $\rho \approx 1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 이고, 이를 통해 구한 시트 저항 $R_{s1} = \frac{\rho}{x_{j1}} = \frac{1 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}}{6.778 \times 10^{-6} \text{ cm}} = 147 \Omega / \text{square}$ 이다. (b)의 경우에는 Figure 4.8에서 불순물 농도 $N_{02} = 3.46 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 일 때, 비저항 $\rho \approx 1 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 이고, 이를 통해 구한 시트 저항 $R_{s2} = \frac{\rho}{x_{j2}} = \frac{1 \times 10^{-2} \Omega \text{ cm}}{2.628 \times 10^{-4} \text{ cm}} = 38.05 \Omega / \text{square}$ 이다. 따라서 x_j 가 증가하면 R_s 가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

다음으로 graphical 하게 Irvin's curve를 사용하여 분석 하면 (a)의 경우, 그림 (c)에서 $N_B = 9 \times 10^{16} \approx 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_{01} = 3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 에 해당하는 선을 그으면 $R_{s1} x_{j1} = 20 \Omega \cdot \mu \text{ m}$ 이다. 이 값을 $x_{j1} = 6.778 \times 10^{-6} \text{ cm} = 6.778 \times 10^{-2} \mu \text{ m}$ 으로 나누면 $R_{s1} = 295 \Omega / \text{square}$ 이다.

(b)의 경우, 그림 (d)에서 $N_B = 9 \times 10^{16} \approx 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_{02} = 3.46 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 을 만족하는 선을 그으면 $R_{s2} x_{j2} = 500 \Omega \cdot \mu \text{ m}$ 이다. 이 값을 $x_{j2} = 2.628 \times 10^{-4} \text{ cm} = 2.628 \mu \text{ m}$ 으로 나누면 $R_{s2} = 26.64 \Omega / \text{square}$ 이다.

※ 계산 값과 Irvin's curve를 이용하여 구한 시트 저항 값에 차이가 있는 이유는 계산 시에 비저항을 계산할 때, Figure 4.8에서 도너와 어셉터가 같이 존재하는 기판에 대해서 임의로 구한 것이기 때문에 오차가 존재한다.