

Field Plate 구조의 표면 포텐셜과 항복전압의 결정 및 계면전하의 영향

論文
46~1~13

Surface Potential and Breakdown Voltage of Field Plate Structure and Effect of Interface Charge

鄭相九* · 韓承燁**
(Sang-Koo Chung · Seung-Youp Han)

Abstract - Useful design curves of breakdown voltage for the field plate structure are provided, which allow a quick determination of breakdown voltage when field plate length, oxide thickness, and substrate doping concentration are given. The effects of the interface charge on the breakdown voltage are analyzed and determined. An approximate equation for the surface potential is also derived with an analytic expression for the equipotential lines of the depletion region under the field plate. The analytic results show a fair agreement with the simulations using MEDICI.

Key Words : Breakdown Voltage, Field Plate, Surface Potential, Interface Charge

1. 서 론

Field plate는 전력 반도체 소자에서 항복전압을 증가시키기 위해 가장 많이 사용되는 구조로서 Grove[1] 등에 의하여 처음 발표된 이래 많은 연구가 되어 왔다[2~5]. 그러나 field plate의 길이와 산화층의 두께, 반도체의 농도 등의 소자변수에 의하여 항복전압을 바로 결정할 수 있는 설계곡선은 아직 발표된 바 없으며, 따라서 많은 계산 시간이 요구되는 컴퓨터 시뮬레이션에 의존하고 있는 형편이다.

우리는 최근 발표한 논문[6]에서 영상전하법을 이용하여 field plate 구조를 해석하고 field plate 가장자리에서의 전계의 첨두치는 field plate 상에 유도된 면전하가 지배하며 반도체 내부의 공핍층 공간전하에 의한 영향은 field plate의 길이, L 이 충분히 긴 경우 산화층 두께, T 와 공핍층 폭 W_s 의 비, T/W_s 가 작으면 무시할 수 있음을 밝힌바 있다.

본 논문에서는 영상 전하법에 의하여 field plate를 갖는 p-n 접합에서 반도체 표면의 포텐셜을 근사적으로 구하는 해석방법을 제시하고, 그 결과를 MEDICI 시뮬레이션 결과와 비교하였으며, field plate 아래 공핍층의 등전위선이 인가전압에 따라 어떻게 변하는가를 해석적으로 나타냈다. 또한 field plate 가장자리에서 항복이 일어난다고 가정하여 field plate의 길이와 산화층 두께 및 반도체 농도에 의하여 항복전압을 바로 결정할 수 있는 설계곡선을 얻었으며, 이 곡선을 이들 변수의 각 조합마다 수행한 MEDICI 시뮬레이션 결과와 비교하여 설계곡선의 타당성을 제시하였다. 마지막으로 반도체 표면에 존재할 수 있는 계면전하가 항복전압에 미치는 영향을 간단히 결정할 수 있는 해석방법을 제시

하였으며, 계면전하가 있을 경우의 field plate 구조의 항복전압에 관한 MEDICI 시뮬레이션 결과와 비교 하였다.

2. 등전위선과 표면전위

2.1 등전위선

그림 1에 field plate를 갖는 pn 다이오드의 구조를 나타냈다. xy 면에 수직으로 뻗어 있는 field plate 상의 면전하 밀도를 ρ_s (Coul/cm²)라 하면, 이 면전하에 의한 Si 내부의 임의점 P의 전위는 영상 전하법에 의하면 $\rho_s' = 2\epsilon_s \rho_s / (\epsilon_s + \epsilon_i)$ 의 면전하가 field plate 위에 있을 때와 같다.

Field plate 위의 전하를 선전하 밀도 $\rho_L = \rho_s' dx'$ 가 xy 면에 수직으로 놓였다고 가정하면, 이 선전하에 의한 임의 점, P(x,y)의 전위는 다음과 같다.

$$\nabla V(x, y) = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_s} \ln \frac{r_B}{r} \quad (1)$$

여기서 r 은 선전하 $\rho_L(x', -T)$ 로부터 Si 내부의 임의의 점 P까지의 거리를 나타내며, r_B 는 전위가 0이 되는 가상점까지의 거리를 나타낸다. 위의 관계식으로부터

$$\nabla V(x, y) = \frac{\rho_s dx'}{\pi(1+k)\epsilon_s} \ln \frac{r_B}{\sqrt{(x-x')^2 + (y+T)^2}} \quad (2)$$

이 된다. 여기서 $k = \epsilon_i / \epsilon_s$ 이며 ϵ_i 는 SiO₂의 유전율이며, ϵ_s 는 Si의 유전율이다. 따라서 $x' = -L/2$ 에서 $x' = L/2$ 까지의 전체 선전하에 의한 P점의 전위는

$$V(x, y) = \frac{\rho_s L \ln r_B}{\pi(1+k)\epsilon_s} - \frac{\rho_s}{2\pi(1+k)\epsilon_s} I(x, y) \quad (3)$$

이 되며, 여기서

* 正 會 員 : 亞 洲 大 工 大 電 子 工 學 科 教 授 · 工 博

** 正 會 員 : 亞 洲 大 學 院 電 子 工 學 科 博 士 課 程

接 受 日 字 : 1995年 8月 22日

1次 修 正 : 1995年 10月 20日

2次 修 正 : 1995年 12月 24日

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= \int_{-L/2}^{L/2} \ln[(x-x')^2 + (y+T)^2] dx' \\
 &= -2L + 2(y+T) \left[\tan^{-1}\left(\frac{L/2-x}{y+T}\right) \right. \\
 &\quad \left. + \tan^{-1}\left(\frac{L/2+x}{y+T}\right) \right] \\
 &\quad + \left(\frac{L}{2}-x\right) \ln\left[\left(\frac{L}{2}-x\right)^2 + (y+T)^2\right] \\
 &\quad + \left(\frac{L}{2}+x\right) \ln\left[\left(\frac{L}{2}+x\right)^2 + (y+T)^2\right] \quad (4)
 \end{aligned}$$

가 된다. 그림 1에서 field plate 위에 유기되는 면전하는 $\rho_s < 0$ 이므로 P점의 전위는 식 (3)과 (4)에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V(x, y) = \frac{|\rho_s|}{2\pi(1+k)\epsilon_s} [I(x, y) - 2L \ln r_B] \quad (5)$$

공핍층의 경계면은 다음과 같이 구할 수 있다. 먼저 $x=0$ 의 공핍층 폭을 W_s 라 하면 이 점의 전위, $V(0, W_s)$ 와 등전위를 갖는 점들, 즉 $V(x, y) = V(0, W_s)$ 을 만족하는 등전위선은

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= I(0, W_s) \\
 &= -2L + 4(W_s + T) \tan^{-1}\left(\frac{L}{2(W_s + T)}\right) \\
 &\quad + L \ln\left[\left(\frac{L}{2}\right)^2 + (W_s + T)^2\right] \quad (6)
 \end{aligned}$$

을 만족하여야 한다. 여기서 $I(x, y)$ 는 식 (4)에서 주어졌으므로 양변을 L 로 정규화하여 $I(0, W_s)/L$ 및 $I(x, y)/L$ 을 구하여 서로 같다고 놓으면 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 2\omega_x \left[\tan^{-1}\left(\frac{1/2-z}{\omega_x}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{1/2+z}{\omega_x}\right) \right] \\
 + \left(\frac{1}{2}-z\right) \ln\left[\left(\frac{1}{2}-z\right)^2 + \omega_x^2\right] \\
 + \left(\frac{1}{2}+z\right) \ln\left[\left(\frac{1}{2}+z\right)^2 + \omega_x^2\right] = f(\omega_o) \quad (7)
 \end{aligned}$$

여기서

$$f(\omega_o) = 4\omega_o \tan^{-1}\left(\frac{1}{2\omega_o}\right) + \ln\left[\frac{1}{4} + \omega_o^2\right] \quad (8)$$

이며, $z=x/L$ 이고 $\omega_o = (W_s+T)/L$ 및 $\omega_x = (W(x)+T)/L$ 로서 이는 식 (6)을 만족하는 y 를 $y=W(x)$ 로 놓을 때 얻어진다.

따라서 식 (7) 및 (8)을 풀면 field plate 아래에 있는 공핍층의 경계면을 결정하는 $\omega_x(z)$ 는 주어진 ω_o 로부터 z 의 함수로 구할 수 있다. 그림 2에 $\omega_o = 1/3, 1/2, 2/3,$ 및 1일때

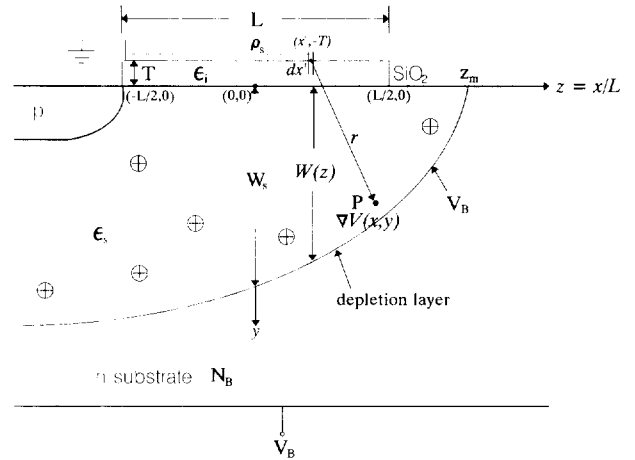


그림 1 Field Plate 구조 pn 다이오드의 단면도
Fig. 1 Cross-section of pn diode with a field plate

식 (7)을 만족하는 $\omega_x(z)$ 를 나타냈다. 이는 인가전압, V_B 및 산화층 두께, T 가 일정할 때 field plate의 길이 L 에 따라 공핍층의 변화를 나타내는 것으로 L 이 클수록(즉 ω_o 가 작을수록) 공핍층곡선이 타원형에 가깝고, L 이 작아지면 원형에 가까운 것을 알 수 있다.

2.2 표면전위

그림 1에서 $y=0$ 인 면, 즉 field plate 아래 SiO_2 와 Si 의 경계면의 포텐셜, $\phi_s(z)$ 은 p' 전극이 접지되어 있으므로 0V에서 시작하여 field plate 가장자리 부근의 $z=z_m$ 에서 인가전압 V_B 에 이르기까지 변화한다. 식 (4)에 $y=0$ 을 대입하고 L 로 정규화한 후, $l=L/T$ 을 사용하면

$$\begin{aligned}
 I_s(z) &= \frac{2}{l} \left[\tan^{-1}\left\{l\left(z + \frac{1}{2}\right)\right\} - \tan^{-1}\left\{l\left(z - \frac{1}{2}\right)\right\} \right] \\
 &\quad - 2 + \left(z + \frac{1}{2}\right) \ln\left[\left(z + \frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{1}{l}\right)^2\right] \\
 &\quad - \left(z - \frac{1}{2}\right) \ln\left[\left(z - \frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{1}{l}\right)^2\right] \quad (9)
 \end{aligned}$$

을 얻을 수 있다. 이는 field plate상에 유기된 균일한 면전하, ρ_s 에 의한 $y=0$ 표면의 포텐셜을 field plate의 길이, L 로 정규화한 값이다. 실제 표면 포텐셜의 변화가 이에 비례한다고 가정하고 β 를 그 비례상수로 하면

$$\phi_s(z) - \phi_s(0) = \beta [I_s(z) - I_s(0)] \quad (10)$$

을 얻는다. 여기서 $\phi_s(0)$ 는 field plate 중앙점 밑의 SiO_2/Si 경계면 포텐셜로 표면 포텐셜의 기준이 된다. 한편 그림 1에서 field plate 아래 임의의 점 z 에서 외부 인가전압 V_B 는 폭 $W(z)$ 의 공핍층에 떨어지는 전압과 산화층에 떨어지는 전압, 즉 지금의 경우 표면 포텐셜의 합이므로

$$\phi_s(z) = V_B - \frac{qN_B}{2\epsilon_s} W^2(z) \quad (11)$$

으로 주어진다. 따라서 $\phi_s(0) = V_B - V_{so}$ 로 주어지며

$$V_{so} = \frac{qN_B}{2\epsilon_s} W_s^2 \quad (12)$$

이다. 여기서 W_s 는 $y=0$ 인 면에서 Gauss의 정리를 적용한 경계조건으로부터

$$W_s = \sqrt{\left(\frac{T}{k}\right)^2 + \left(\frac{V_B}{qN_B/2\epsilon_s}\right)^2} - \frac{T}{k} \quad (13)$$

로 주어진다[4].

식 (10)에서 비례상수, β 를 구하기 위하여는 field plate 면전하, ρ_s 에 의한 전계의 x 성분이 z 의 기함수인 반면 식 (9)의 $I_s(z)$ 는 z 의 우함수인 것을 고려하고 $\phi_s(-1/2) = 0$ 의 조건을 만족하도록 하여야 한다. 그 결과는

$$\phi_s(z) = \phi_s(0) \pm \phi_s(0) \frac{I_s(z) - I(0)}{I_s(1/2) - I(0)} \quad \text{for } 0 \leq |z| \leq \frac{1}{2} \quad (14)$$

이 되고, 여기서 $+$ 는 $z > 0$, $-$ 는 $z < 0$ 일 때에 해당한다.

한편 식 (14)로부터 $\phi_s(1/2) = 2\phi_s(0)$ 임을 알 수 있고 또 $\phi_s(z_m) = V_B$ 이어야 하므로 이 조건을 $1/2 \leq z \leq z_m$ 에서 만족하도록 하는 표면 포텐셜은

$$\phi_s(z) = 2\phi_s(0) + (2V_{so} - V_B) \frac{I_s(z) - I(1/2)}{I_s(z_m) - I(1/2)} \quad (15)$$

이 되며,

$$z_m = \frac{L}{2 \tanh(\tan^{-1} L/2W_s)} \quad (16)$$

이 됨을 참고문헌[6]에서 밝힌 바 있다.

식 (14)와 (15)는 field plate 바로 아래, 즉 $0 \leq |z| \leq 1/2$ 영역과 field plate 가장자리를 벗어난 영역, 즉 $z \geq 1/2$ 영역에서 비례상수 β 가 서로 다른 값을, 즉 두 영역에서 면전하, ρ_s 의 영향이 서로 다르게 나타내며 이는 식 (10)은 공핍층 내의 전하에 의한 영향을 무시한 근사식이기 때문이다. 그림 3에 field plate가 p'n접합이 끝나는 점, 즉 $x = 18 \mu\text{m}$ 에서 시작하여 $L = 20 \mu\text{m}$, $T = 0.5 \mu\text{m}$, $V_B = 176 \text{ V}$ 의 경우 식 (12), (13) 및 (16)으로부터 얻어진 $z_m = 1.1$, $W_s = 19 \mu\text{m}$, $V_{so} = 151 \text{ V}$ 를 이용하여 위의 근사식 (14)와 (15)에 의하여 계산된 $\phi_s(z)$ 를 MEDICI 시뮬레이션 결과와 비교하였는데, 비교적 잘 일치하고 있으며 두 곡선의 차이가 공핍층 전하에 의한 영향이므로 $z \geq 1/2$ 영역에서 식 (10)에서 무시한 공핍층 전하의 영향이 비교적 큰 것을 알 수 있다.

3. Field Plate의 가장자리에 의한 항복전압

식 (14) 및 (15)의 표면전위로부터 표면전계를 구할 수 있다. 그러나 참고논문[6]에서 field plate 위의 면전하, ρ_s 에

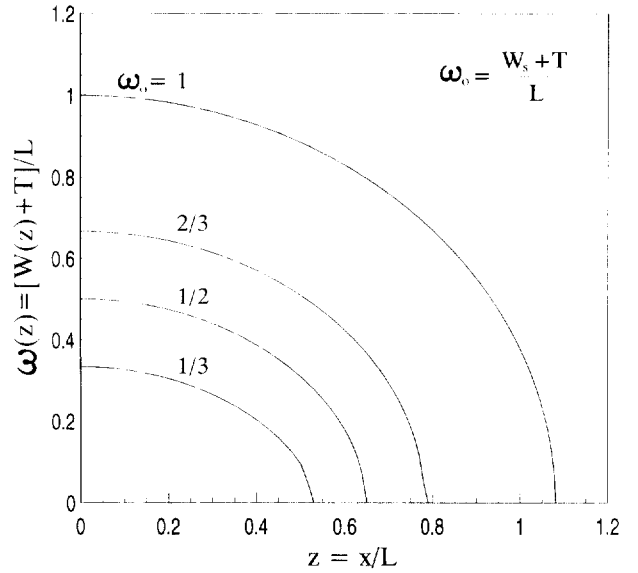


그림 2 Field plate 아래 등전위선의 해석적인 결과
Fig. 2 Analytical results for equipotential lines under the field plate

의한 반도체 내의 임의점의 전계의 세기는 영상전하법으로 직접 구할 수 있음을 보여주었는데, 그 결과를 여기에 사용하면

$$E_x(x, y) = \frac{\rho_s}{\pi(\epsilon_i + \epsilon_s)} \ln \sqrt{\frac{(x+L/2)^2 + (y+T)^2}{(x-L/2)^2 + (y+T)^2}} \quad (17)$$

$$E_y(x, y) = \frac{\rho_s}{\pi(\epsilon_i + \epsilon_s)} \left[\tan^{-1} \left(\frac{x+L/2}{y+T} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{x-L/2}{y+T} \right) \right] \quad (18)$$

이 된다. Field plate의 길이가 충분히 큰 경우에는 그림 2의 $\omega_0 = 1/2$ 에서 나타낸 것과 같이 공핍층을 가로 L_s 및 세로 W_s 의 사각형으로 근사시킬 수 있으며, 이때 면전하 밀도, ρ_s 는 charge neutrality의 조건으로부터

$$\rho_s = \frac{qN_B W_s L_s}{L} \quad (19)$$

과 같이 주어진다.

따라서 $y = 0$ 표면에서의 전계성분은 원점을 $(-1/2, 0)$ 으로 옮길 때

$$E_x(z) = \left(\frac{qN_B}{2\epsilon_s} \right) \frac{2W_s}{\pi(1+k)a} \ln \sqrt{\frac{z^2 + (1/D)^2}{(z-1)^2 + (1/D)^2}} \quad (20)$$

$$E_y(z) = \left(\frac{qN_B}{2\epsilon_s} \right) \frac{2W_s}{\pi(1+k)a} \left[\tan^{-1}(z/D) - \tan^{-1}\{(z-1)\} \right] \quad (21)$$

이 된다. 여기서 $a = L/2z_m$ 이다.

Field plate의 가장자리에서 표면전계의 침두값은 field plate 상의 면전하, ρ_s 에 의한 전체전계, $E_T(z) = [E_x^2(z) + E_y^2(z)]^{1/2}$ 가 지배함을 이용하면 field plate 가장자리에서의 항복조건으로 $\alpha L \int_{-\infty}^1 |E_T|^7 dz = 1$ 을 근사적으로 사용할 수 있다. 여기서 $\alpha = 1.8 \times 10^{-35}$ [7]이다. 이로부터

$$\alpha L \left(\frac{qN_B}{\epsilon_s} \right)^7 \frac{W_s^7 I_T}{[\pi(1+k)a]^7} = 1 \quad (22)$$

가 되며, 여기서

$$I_T = \int_{-\infty}^1 \left[\left(\ln \sqrt{\frac{z^2 + (1/D)^2}{(z-1)^2 + (1/D)^2}} \right)^2 + \{ \tan^{-1}(zD) - \tan^{-1}[k(z-1)] \}^2 \right]^{7/2} dz \quad (23)$$

이다. 한편 이상적인 평면접합의 경우에 항복시의 공핍층 두께, W_{pp} 는 다음식으로 주어진다[2].

$$W_{pp}^{-8} = \frac{\alpha}{8} \left(\frac{qN_B}{\epsilon_s} \right)^7 \quad (24)$$

따라서 이 식을 이용하면 식 (22)로부터

$$\left(\frac{1}{W_{pp}} \right)^8 = \frac{\pi^7}{2^3} \frac{[(1+k)a]^7}{L W_s^7 I_T} \quad (25)$$

을 얻을 수 있고, 또한 이로부터

$$\left(\frac{W_p}{W_{pp}} \right)^8 = \frac{\pi^7}{2^3} \frac{1}{I_T} \frac{W_p}{L} \left(\frac{W_p}{W_s} \right)^7 (1+k)^7 a^7 \quad (26)$$

을 얻을 수 있다. 여기서 W_p 는 field plate의 중앙에서 공핍층 폭이 W_s 일 때 p'n 평면접합의 공핍층 폭을 나타낸다.

W_s 와 W_p 의 관계는 식 (13)에 $V_B = (qN_B/2\epsilon_s)W_p^2$ 의 관계를 이용하면

$$W_s = \sqrt{\left(\frac{T}{k} \right)^2 + W_p^2} - \frac{T}{k} \quad (27)$$

주어지므로 이로부터

$$W_p = W_s \sqrt{1 + \frac{2}{k} \frac{T}{W_s}} \quad (28)$$

의 관계를 구할 수 있다. $x = T/W_s$ 라 하면 식 (28)로부터

$$\frac{W_p}{W_s} = \sqrt{1 + \frac{2}{k} x} \quad (29)$$

및

$$\frac{W_p}{L} = lx \sqrt{1 + \frac{2}{k} x} \quad (30)$$

을 얻을 수 있다. 따라서 식 (26)은

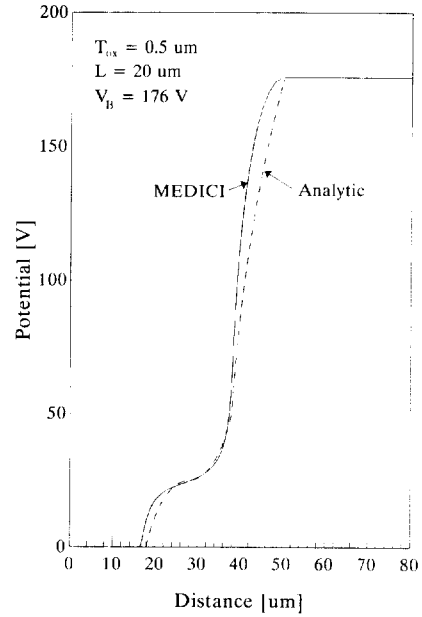


그림 3 표면전위에 대한 시뮬레이션 및 해석적인 결과
Fig. 3 Simulation and analytical results for surface potential

$$\left(\frac{W_p}{W_{pp}} \right)^8 = \frac{\pi^7}{2^3} \frac{\left(1 + \frac{2}{k} x\right)^4 (1+k)^7 a^7}{lx I_T} \quad (31)$$

이 된다. 여기서 이상적인 평면접합의 항복전압, BV_{pp} 로 정규화한 field plate 가장자리에서의 항복전압, BV_p 는 $R = BV_p/BV_{pp} = (W_p/W_{pp})^2$ 이므로

$$R = \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{2}{\pi} \right)^{1/4} \frac{(1+k)^{7/4} a^{7/4} \left(1 + \frac{2x}{k}\right)}{(lx I_T)^{1/4}} \quad (32)$$

을 얻는다.

다른 한편 식 (28)로부터

$$R = \left(\frac{W_s}{T} \frac{T}{W_{pp}} \right)^2 \left(1 + \frac{2}{k} \frac{T}{W_s}\right) = \left(\frac{T}{W_{pp} x} \right)^2 \left(1 + \frac{2}{k} x\right) \quad (33)$$

을 얻을 수 있다. 그림 4는 $BV_p = 463$ V, 즉 $W_{pp} = 34 \mu m$ 의 경우 식 (32) 및 (33)에서 각각 L/T 및 T/W_{pp} 를 파라미터로 한 R 과 x 의 관계를 보여주는데 두 곡선의 교차점이 항복전압시의 R 및 x 값을 나타낸다. 표 1은 시뮬레이션 결과에 사용된 대표적인 L 과 T 의 여러값에 대하여 MEDICI 시뮬레이션 결과로 얻어진 항복전압으로서 그 결과를 그림 4에 함께 나타냈으며 두 결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 MEDICI 시뮬레이션 결과에 의하면 산화층 두께 T 가 증가하여 $T \geq 0.441W_{pp}$ 에서는 field plate 가장자리에서 보다는 p'n 접합 가장자리에서 항복이 일어남에도 불구하고 항복전압은 그림 4의 곡선을 따라 L 의 증가와 함께 증가함을 알 수 있다. 한편 같은 시뮬레이션 결과에 의하면

표 1 Field plate 구조 pn 다이오드의 항복전압에 대한 시뮬레이션 결과($R = BV_p/BV_{pp}$)

Table 1 Simulation results for breakdown voltage of field plated pn diode. ($R = BV_p/BV_{pp}$)

L [μm]	T [μm]	L/T	T/W _{pp}	BV _p (sim) [V]	R(sim)	R(theory)
20	0.5	40	0.0147	182	0.393	0.4
	1.0	20	0.0294	260	0.562	0.53
	1.5	13.3	0.0441	305	0.658	0.62
30	0.5	60	0.0147	212	0.458	0.48
	1.0	30	0.0294	284	0.613	0.62
	1.5	20	0.0441	323	0.697	0.72
40	0.5	80	0.0147	212	0.458	0.55
	1.0	40	0.0294	284	0.613	0.68
	1.5	26.7	0.0441	330	0.713	0.77

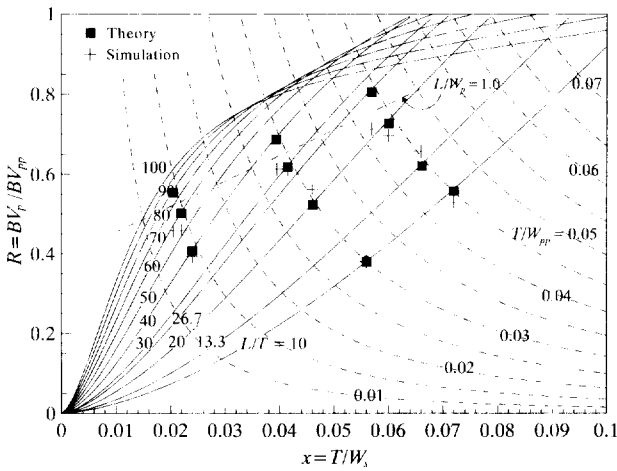


그림 4 Field plate 가장자리의 항복전압에 대한 설계곡선과 시뮬레이션 결과의 비교

Fig 4. Comparison between analytical design curves and simulations for breakdown voltage at field plate edge

field plate의 길이, L이 점점 증가하여 $L/W_{pp} \approx 1.0$ 이상이면 항복전압은 포화됨을 알 수 있는데 이는 참고문헌[5]에서 지적인 바와 같다.

그림 4는 field plate에서 field plate의 길이, L 및 산화막 층의 두께, T에 의하여 field plate 구조의 항복전압을 이상적인 평면접합의 항복전압의 비로 바로 나타냄으로써 field plate 구조 설계에 유용하게 사용될 수 있는 설계곡선을 제공한다.

4. 계면전하가 항복전압에 미치는 영향

SiO₂/Si의 경계면에 존재하는 계면전하는 항상 양의 전하,

즉 $Q_{ss} > 0$ 이므로 이의 영향은 다음 두가지 경우에 따라 고려할 수 있다. 먼저 $\rho_s < 0$ 인 경우 그림 1에 나타난 것과 같이 p-n 다이오드의 n기판 반도체에 외부 바이어스전압 $V_B > 0$ 이 인가된 경우로 field plate 위에는 -전하를 띄게 된다. 따라서 전계는 반도체 내부에서 field plate쪽으로 향하게 된다. 한편 $\rho_s > 0$ 인 경우에는 그림 1과 정반대의 경우로서 n-p 접합 다이오드의 n' 전극 및 field plate에 외부 바이어스 전압 $V_B > 0$ 이 인가되고 p기판이 접지된 경우인데 field plate 위에는 +전하를 띄게 되며 전계는 field plate에서 반도체 내부로 향하게 된다. 이때 반도체 내부의 전계는 E_s 이고, 산화막 층의 전계는 E_{ox} 이다.

반도체 내의 y방향 전계를

$$E_s(y) = \frac{qN_B}{\epsilon_s}(W_s - y) \tag{34}$$

라고 하고, $y = 0$ 인 면, 즉 SiO₂/Si 경계면에 Gauss의 정리를 적용하면

$$\pm[\epsilon_s E_{ox} - \epsilon_i E_s(0)] = Q_{ss} \tag{35}$$

을 얻는다. 여기서 +는 $\rho_s < 0$ 이고, -는 $\rho_s > 0$ 인 경우에 해당한다.

한편 $\rho_s = 0$ 일 때 계면전하 Q_{ss} 만에 의한 공핍층 폭을 W_{ss} 라 하면

$$Q_{ss} = qN_B W_{ss} \tag{36}$$

가 되며, 식 (34)와 (35)로부터 면전하 밀도 ρ_s 는 다음과 같이 주어진다.

$$\rho_s = \epsilon_i E_{ox} = \epsilon_s E_s(0) \pm Q_{ss} = qN_B(W_s \pm W_{ss}) \tag{37}$$

이 식에서

$$E_{ox} = \frac{qN_B}{\epsilon_i}(W_s \pm W_{ss}) \tag{38}$$

을 얻을 수 있다.

전체전압은 산화막 층 및 반도체 내부에서 떨어지는 전압 V_{ox} 와 V_{si} 의 합이므로

$$V_B = V_{ox} + V_{si} = \frac{qN_B}{2\epsilon_s} W_p^2 = E_{ox} T + \frac{qN_B}{2\epsilon_s} W_s^2 \tag{39}$$

이 된다. 식 (38)과 (39)에 의하여

$$W_p^2 = 2 \frac{\epsilon_s}{\epsilon_i} (W_s \pm W_{ss}) T + W_s^2 \tag{40}$$

을 얻게 된다. 따라서

$$W_s = \sqrt{\left(\frac{T}{k}\right)^2 + W_p^2 \mp \frac{2}{k} W_{ss} T - \frac{T}{k}} \tag{41}$$

를 얻을 수 있으며, 이때 W_s 는 field plate 아래 $x=0$ 에서의 공핍층 폭을 나타낸다. $Q_{ss}=0$ 일때의 폭을 W_{so} 라 하면 식 (41)로부터

$$W_s \approx W_{so} \pm \frac{W_{ss}}{1+kW_{so}/T} \quad (42)$$

를 얻을 수 있으며, W_s 는 $\rho_s > 0$ 일때로서 계면전하가 없을 때의 공핍층 폭, W_{so} 보다 공핍층 폭이 증가하며 한편 W_s 는 $\rho_s < 0$ 의 경우로서 공핍층 폭이 감소함을 나타낸다.

식 (42)를 T 로 나누면

$$\frac{1}{x_1} = \frac{1}{x_o} \pm \frac{W_{ss}/T}{1+k/x_o} \quad (43)$$

이 된다. 여기서 $x_1 = W_{s1}/T$ 및 $x_o = W_{so}/T$ 이다. 따라서 식 (33)을 이용하면

$$\frac{R_1}{R_o} = \frac{\left(\frac{1}{x_1}\right)\left(\frac{1}{x_1} + \frac{2}{k}\right)}{\left(\frac{1}{x_o}\right)\left(\frac{1}{x_o} + \frac{2}{k}\right)} \quad (44)$$

을 얻을 수 있고, 여기서 R_1 및 R_o 는 $x=x_1$ 및 x_o 에서 항복전압비를 나타낸다.

식 (43)과 (44)로부터

$$\frac{R_1}{R_o} = \left(1 \pm \frac{W_{ss}}{kT} x_o^2\right) \left(1 \pm \frac{W_{ss}}{kT} \frac{x_o^2}{1 + \frac{2}{k} x_o}\right) \quad (45)$$

이 된다. 따라서 계면전하 Q_{ss} 가 항복전압에 미치는 영향은 $\rho_s > 0$ 의 경우는 증가하고, $\rho_s < 0$ 인 경우는 반대로 감소함을 알 수 있다.

한편 식 (27)로부터 x_o 와 R_o 의 관계는

$$x_o = \sqrt{\left(\frac{1}{k}\right)^2 + R_o \left(\frac{W_{fp}}{T}\right)^2} - \frac{1}{k} \quad (46)$$

로 주어진다.

다음 표 2에 $N_B = 5.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (즉 $W_{fp} = 34 \mu\text{m}$) 일 때 $Q_{ss} = 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 이라 가정하여 $W_{ss} = 9 \mu\text{m}$ 인 경우에 항복전압의 변화를 식 (45) 및 (46)에 의하여 계산된 값과 MEDICI 시뮬레이션 결과를 비교해 본 결과 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

한편 $\rho_s > 0$ 인 경우 지금까지 고려한 p'n 접합 대신 n'p 접합에서 n' 및 field plate에 +V를 인가하는 경우에 해당하며 p층의 도핑이 $N_B = 5.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 이며 $Q_{ss} = 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 의 계면전하에 의한 항복전압의 변화와 시뮬레이션 결과를 표 3에 나타냈다.

$\rho_s > 0$ 인 경우에도 이론치와 시뮬레이션 결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 계면전하 Q_{ss} 에 의한 항복전압의 변화는 여기서 제시한 간단한 계산방법으로 구할 수 있음을 알게 되었다.

표 2 음의 표면전하($\rho_s < 0$)일때 field plate 구조 pn 다이오드의 항복전압에 대한 계면전하의 영향

Table 2 Effect of interface charge on breakdown voltage of field plated pn diode with negative surface charge

L [μm]	T [μm]	R _o	R(sim)	R(theory)
20	0.5	0.39	0.35	0.36
	1.0	0.56	0.53	0.51
	1.5	0.66	0.57	0.59
30	0.5	0.46	0.41	0.43
	1.0	0.61	0.58	0.56
	1.5	0.7	0.61	0.63
40	0.5	0.45	0.41	0.43
	1.0	0.61	0.59	0.56
	1.5	0.71	0.61	0.64

표 3 양의 표면전하($\rho_s > 0$)일때 field plate 구조 pn 다이오드의 항복전압에 대한 계면전하의 영향 ($L=20\mu\text{m}$)

Table 3 Effect of interface charge on breakdown voltage of field plated pn diode with positive surface charge. ($L=20\mu\text{m}$)

T [μm]	R _o	R(sim)	R(theory)
0.5	0.4	0.53	0.43
1.0	0.58	0.69	0.63
1.5	0.72	0.81	0.77

5. 결 론

Field plate 구조의 항복전압을 field plate의 길이, 산화층의 두께 및 반도체 농도만으로 결정할 수 있는 설계곡선을 처음으로 제안하였고, 또 계면전하에 의한 항복전압의 변화를 이 곡선으로부터 해석적으로 쉽게 결정하도록 하였다. 본 논문에서 제안한 설계곡선은 MEDICI 시뮬레이션과 비교한 결과 잘 일치함을 나타냈다. 따라서 field plate 구조의 설계에 대단히 유용하게 응용될 것으로 기대된다. 그리고 여기서 유도된 field plate의 표면전압에 대한 근사식도 전력 반도체용 pn 다이오드 및 LDMOSFET 등의 설계에 매우 유용할 것으로 기대된다.

이 연구는 95년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과임.(과제번호 : 95-0100-05-01-3)

참 고 문 헌

- [1] A. Grove, et al., "Effects of surface fields on the breakdown voltage of planar silicon p-n junctions," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 14, pp. 157-162, 1967.
- [2] B. J. Baliga, ed., *High Voltage Integrated Circuits*, New

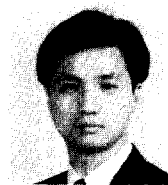
- York, IEEE Press, 1988.
- [3] K. Brieger, *et al.*, "The contour of an optimal field plate—an analytical approach," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 35, pp. 157-162, 1988.
- [4] A. Rusu and C. Bulucea, "Deep-depletion breakdown voltage of silicon-dioxide/silicon MOS capacitors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 26, pp. 202-205, 1979.
- [5] C. Goud and K. Bhat, "Two-dimensional analysis and design considerations of high-voltage planar junction equipped with field plate and guard ring," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 38, pp. 1497-1504, 1991.
- [6] S. K. Chung, *et al.*, "Analytical method for two-dimensional field distribution of a MOS structure with a finite field plate," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 42, pp. 192-194, 1995.
- [7] W. Fulop, "Calculation of avalanche breakdown of silicon p-n junctions," *Solid-State Electron.*, vol. 10, pp. 39-43, 1967.

저 자 소 개



정상구 (鄭相九)

1938년 1월 6일생. 1962년 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1972년 미국 와싱턴대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1974년 동 대학원 졸업(공학박사). 1975~1977 서독 레겐스 불그대 응용물리 연구소 책임연구원. 현재 아주대학교 공과대학 전자공학과 교수



한승엽 (韓承燁)

1963년 6월 5일생. 1990년 아주대 공대 전자공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자공학과 박사과정