

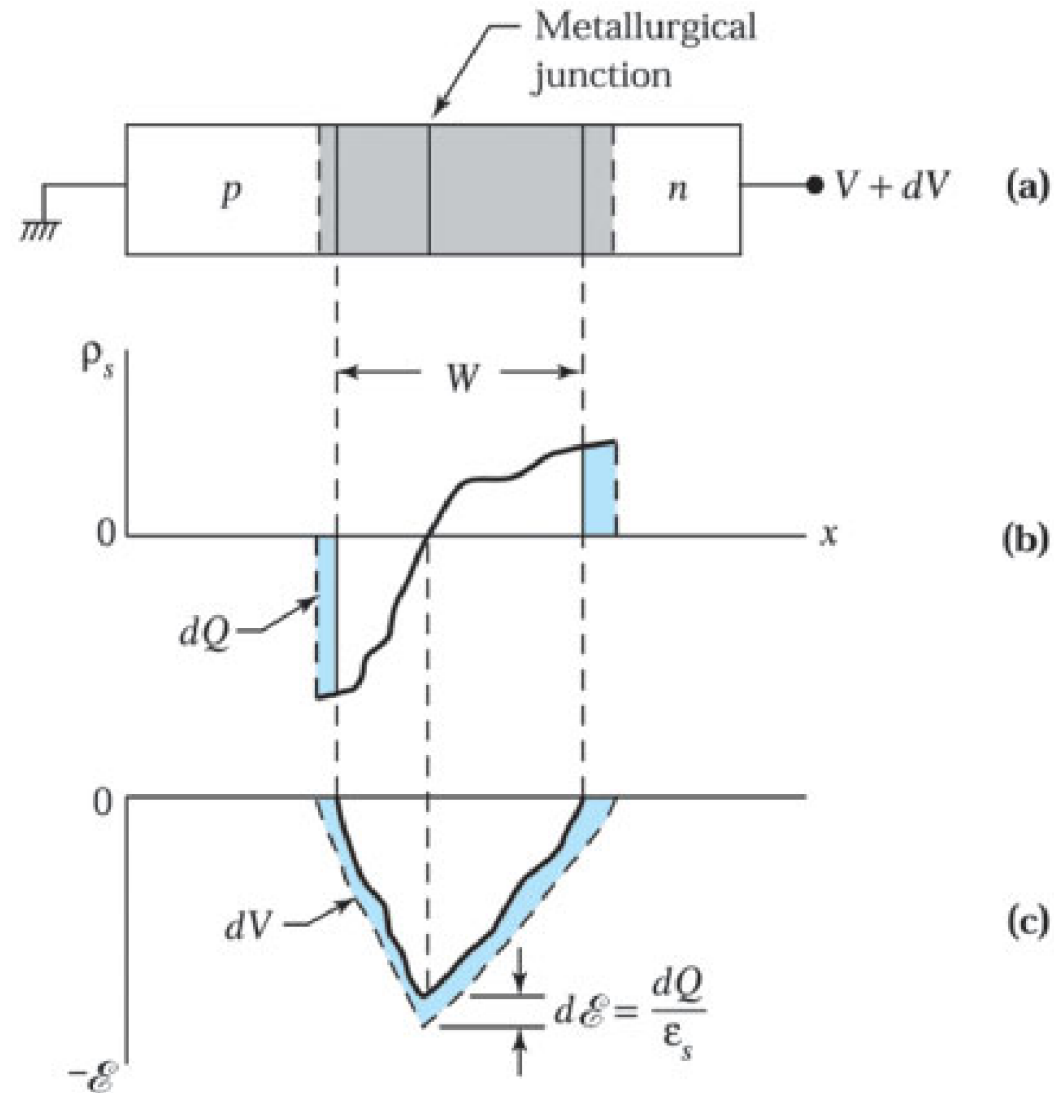


$p-n$ Junction

- ▶ 3.1 THERMAL EQUILIBRIUM CONDITION
- ▶ 3.2 DEPLETION REGION
- ▶ 3.3 DEPLETION CAPACITANCE
- ▶ 3.4 CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS
- ▶ 3.5 CHARGE STORAGE AND TRANSIENT BEHAVIOR
- ▶ 3.6 JUNCTION BREAKDOWN
- ▶ 3.7 HETEROJUNCTION
- ▶ SUMMARY

➔ 3.3 DEPLETION CAPACITANCE

- The junction depletion-layer capacitance per unit area is defined as $C_j = dQ/dV$, where dQ is the incremental change in depletion-layer charge per unit area for an incremental change in the applied voltage dV .
- Figure 11 illustrates the depletion capacitance of a p – n junction with an arbitrary impurity distribution.
- The charge and electric-field distributions indicated by the solid lines correspond to a voltage V applied to the n -side.



توضیح بیشتر در اسلاید بعدی

در شکل C بنا به رابطه $dV = dE \cdot x$ مساحت ناحیه آبی نمایانگر تغییر افزایشی پتانسیل باشد.

Fig. 11 (a) p - n junction with an arbitrary impurity profile under reverse bias. (b) Change in space charge distribution due to change in applied bias. (c) Corresponding change in electric-field distribution.

توضیح نمودار ۱۱

توضیح ۱۱.۵

در نمودارهای قبلی که تا بحال راستیم محور قائم چگالی یونهای ناخالصی بود ولی اینجا چگالی بار است

که فرق اش با حالت قبلی در این است که فقط q (بار الکترون) در چگالی های تعداد یعنی N_A و ...

$$\rho = (-N_A + N_D)q$$

ضرب شده است و اینکه ناحیه آبی افزوده را نشان می دهد یعنی نیز منطقی است چون حاصل ضرب

چگالی در تغییر حجم بار افزوده را خواهد داد و اینجا چون واحد سطح مد نظر هستن حاصل ضرب

چگالی در تغییر طول تغییر بار یا بار افزوده را خواهد داد. یعنی:

$$dQ = \rho dV = \rho A dx \xrightarrow{A=1} dQ = \rho dx \quad (1)$$

چرا $dE = \frac{dQ}{\epsilon_s}$ زیرا:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{dE}{dx} = -\frac{\rho}{\epsilon_s}$$

$\Rightarrow dE = + \frac{\rho}{\epsilon_s} dx$ ← معادله پواسون

بنابراین رابطه (۱) در بالا: $dE = \frac{dQ}{\epsilon_s}$

- If this voltage is increased by an amount dV , the charge and field distributions will expand to those regions bounded by the dashed lines.
- In Fig. 11b, the incremental charge dQ corresponds to the colored area between the two charge distribution curves on either side of the depletion region. ↓
- The incremental space charges on the n- and p-sides of the depletion region are equal but with an opposite charge polarity, thus maintaining overall charge neutrality.

- This incremental charge dQ causes an increase in the electric field by an amount

$$dE = dQ/\epsilon_s \text{ (from Poisson's equation).}$$

- The corresponding change in the applied voltage dV , represented by the colored area

in Fig. 11c, is approximately WdE , which equals WdQ/ϵ_s .

در حالت کلی می توانیم بنویسیم $V=EX$ حالا اگر طرف اول را بصورت دیفرانسیلی بنویسیم کافی است یکی از دو پارامتر طرف راست را دیفرانسیلی بنویسیم که در اینجا X را کل پهنای ناحیه می گیریم که دیفرانسیلی نیست و برابر W است و در عوض دیفرانسیل میدان را لحاظ می کنیم.

- Therefore, the depletion capacitance per unit area is given by

$$C_j \equiv \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ}{W \frac{dQ}{\epsilon_s}} = \frac{\epsilon_s}{W} \quad (33)$$

$$\boxed{C_j = \frac{\epsilon_s}{W} \text{ F / cm}^2.} \quad (33a)$$

3.3.1 Capacitance-Voltage Characteristics

- Equation 33 for the depletion capacitance per unit area is the same as the standard expression for a parallel-plate capacitor where the spacing between the two plates represents the depletion-layer width.
- The equation is valid for any arbitrary impurity distribution.
- In deriving Eq. 33 we have assumed that only the variation of the space charge in the depletion region contributes to the capacitance.
- This certainly is a good assumption for the reverse-bias condition.

- For forward biases, however, a large current can flow across the junction, corresponding to a large number of mobile carriers present within the neutral region.
- The incremental change of these mobile carriers with respect to the biasing voltage contributes an additional term, called the diffusion capacitance, which is considered in Section 3.5.
- For a one-sided abrupt junction, we obtain, from Eqs. 27 and 33,

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s (V_{bi} - V)}{qN_B}},$$

(27)

$$C_j = \frac{\epsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_B}{2(V_{bi} - V)}} \quad (34)$$

$$\boxed{\frac{1}{C_j^2} = \frac{2(V_{bi} - V)}{q\epsilon_s N_B}} \quad (35)$$

- It is clear from Eq. 35 that a plot of $1/C_j^2$ versus V produces a straight line for a one-sided abrupt junction.
- The slope gives the impurity concentration N_B of the substrate, and the intercept (at $1/C_j^2 = 0$) gives V_{bi} .

➔ EXAMPLE 4

For a silicon one-sided abrupt junction with $N_A = 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ and $N_D = 8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, calculate the junction capacitance at zero bias and a reverse bias of 4 V ($T = 300 \text{ K}$).

SOLUTION: From Eqs. 12, 27, and 34, we obtain at zero bias(at reverse bias $V=4v$)

$$V_{bi} = \psi_n - \psi_p = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right). \quad (12)$$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s (V_{bi} - V)}{qN_B}}, \quad (27)$$

$$C_j = \frac{\epsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_B}{2(V_{bi} - V)}} \quad (34)$$

3.3.2 Evaluation of Impurity Distribution

- The capacitance-voltage characteristics can be used to evaluate an arbitrary impurity distribution.
- We consider the case of p^+-n junction with a doping profile on the n-side, as shown in Fig. 12a.
- As before, the incremental change in depletion layer charge per unit area dQ for an incremental change in the applied voltage dV is given by $qN(W)dW$ (i.e., the shaded area in Fig. 12b).

$$\rho = \frac{dQ}{dV} \quad \text{طبق تعریف چگالی بار:}$$

$$\text{چرا } dQ = q N(\omega) d\omega \text{ ?}$$

$$dQ = \rho dV = [q N(\omega)] [A d\omega] \rightarrow \text{المان طول} \times \text{سطح مقطع} = \text{المان حجم}$$

مطابق آنچه در معادله مشهور پواسون (بدیم)

چون هدف واحد سطح است $A=1$ در نظر گرفته شده و خواهیم داشت:

$$dQ = q N(\omega) d\omega$$

(q بار الکترون است ولی dQ تغییر بار در ناحیه تجزیه است)

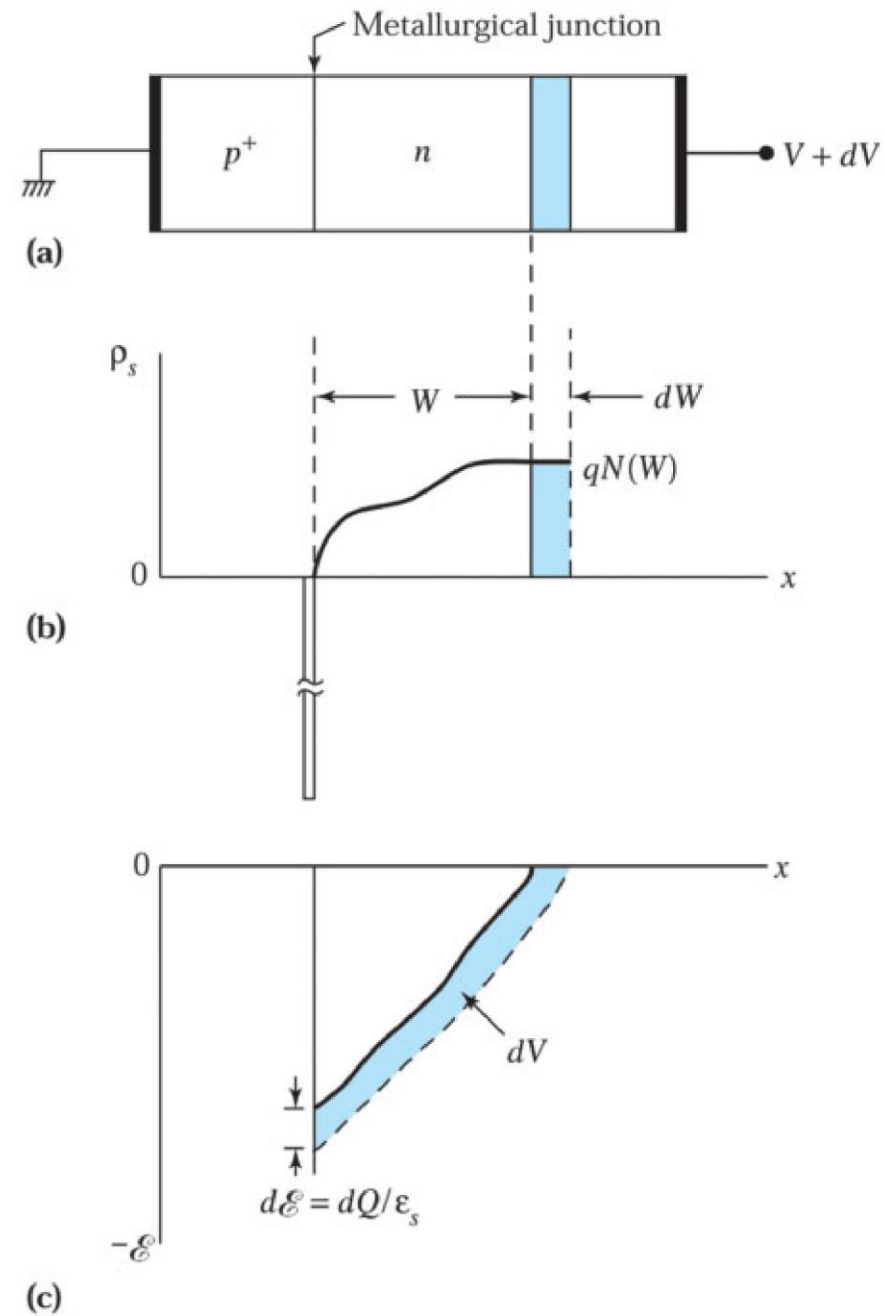


Fig. 12 (a) $p^+ - n$ junction with an arbitrary impurity distribution. (b) Change in space charge distribution in the lightly doped side due to a change in applied bias. (c) Corresponding change in electric-field distribution.

- The corresponding change in applied voltage (shaded area in Fig. 12c) is

$$dV \cong (d\mathcal{E}^{\circ})W = \left(\frac{dQ}{\varepsilon_s} \right) W = \frac{qN(W)dW^2}{2\varepsilon_s}. \quad \text{توضیح بیشتر در اسلاید بعدی} \quad (36)$$

- By substituting W from Eq. 33, we obtain an expression for the impurity concentration at the edge of the depletion region:

$$N(W) = \frac{2}{q\varepsilon_s} \left[\frac{1}{d(1/C_j^2)/dV} \right]. \quad \text{توضیح بیشتر در دو اسلاید بعدی} \quad (37)$$

اثبات رابطه ۴۶:

$$dV = (dE)W \quad (*)$$

طبق معادله پراسون: $\frac{dE}{dx} = \frac{p}{\epsilon_s} \rightarrow$ اینجا $(dx = dw) \rightarrow dE = \frac{p}{\epsilon_s} dw \quad (1)$

$p = \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ}{A dw}$ (بفرض واحد سطح مقطع $A=1$) $\rightarrow p = \frac{dQ}{dw} \quad (2)$

در اسلاید ۵ هم همین رابطه اثبات شده است $(3) \rightarrow dE = \frac{dQ}{\epsilon_s} dw = \frac{dQ}{\epsilon_s} \quad (3)$

قبلاً دیدیم: $dQ = qN(w) dw \quad (4)$

$(*, 3, 4) \quad dV = \frac{dQ}{\epsilon_s} W = \frac{qN(w) dw}{\epsilon_s} W$

$W dw = \frac{1}{r} d(W^r)$

$\rightarrow dV = \frac{qN(w) d(W^r)}{r\epsilon_s}$

اثبات رابطه ۲۷:

از رابطه ۲۴ کتاب

$$N(W) = \frac{r \epsilon_s dV}{q dW^r}$$

$$C_j = \frac{\epsilon_s}{W} \rightarrow W = \frac{\epsilon_s}{C_j}$$

$$N(W) = \frac{r \epsilon_s dV}{q d \left(\frac{\epsilon_s}{C_j} \right)^r} = \frac{r}{q \epsilon_s} \frac{1}{d \left(\frac{1}{C_j^r} \right) / dV}$$

از طرفین بنابه معادله ۳۳:

از دو رابطه فوق:

- Thus, we can measure the capacitance per unit area versus reverse-bias voltage and

plot $1/C_j^2$ versus V .

$$\boxed{\frac{1}{C_j^2} = \frac{2(V_{bi} - V)}{q\epsilon_s N_B}} \quad (35)$$

این برای پیوند تیز یکطرفه در حالت اعمال بایاس است ولی برای حالت‌های دیگر نیز با رابطه مشابهی مواجه ایم

- The slope of the plot, that is, $d(1/C_j^2)/dV$, yields $N(W)$.

- Simultaneously, W is obtained from Eq. 33.
$$C_j \equiv \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ}{W} \frac{dQ}{dV} = \frac{\epsilon_s}{W} \quad (33)$$

- A series of such calculations produces a complete impurity profile.

بعبارتی با استفاده از روابط ۳۳، ۳۵ و ۳۷ مقادیر C ، W و $N(W)$ بدست می آید.

- This approach is referred to as the $C-V$ method for measuring impurity profiles.

یعنی مطابق رابطه ۳۷ مقدار $N(W)=N_B$ بدست می آید و مطابق رابطه ۳۵ و مطابق توضیحات مربوط به اسلاید بعدی با محاسبه عرض از مبدا مقدار V_{bi} بدست می آید. حال به ازای هر V مشخص ظرفیت خازن بدست می آید. حال بنا به رابطه ۳۳ مقدار W محاسبه می شود

- For a linearly graded junction, the depletion layer capacitance is obtained from Eqs.

در این اسلاید پیوند شیبدار خطی بعنوان مثال بحث شده است.

31 and 33:

$$W = \left(\frac{12\epsilon_s V_{bi}}{qa} \right)^{1/3} . \quad (31)$$

$$C_j \equiv \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ}{W \frac{dQ}{\epsilon_s}} = \frac{\epsilon_s}{W} \quad (33)$$

$$C_j = \frac{\epsilon_s}{W} = \left[\frac{qa\epsilon_s^2}{12(V_{bi} - V)} \right]^{1/3} \text{ F / cm}^2 . \quad (38)$$

در اینجا W رابطه ۳۱ در حالت اعمال ولتاژ بایاس نوشته شده است.

- For such a junction we can plot $1/C^3$ versus V and obtain the impurity gradient and

V_{bi} from the slope and the intercept, respectively.

توضیح عبارت پایانی اسلاید قبلی:

جدول ۱۷

$$C_j = \left[\frac{q a \epsilon_s^r}{12(V_{bi} - V)} \right]^{\frac{1}{3}} \rightarrow \frac{1}{C_j^r} = \frac{12(V_{bi} - V)}{q a \epsilon_s^r}$$

$$\rightarrow \frac{1}{C_j^r} = - \frac{12}{q a \epsilon_s^r} V + \frac{12 V_{bi}}{q a \epsilon_s^r}$$

ضریب نمودار

همانگونه که ملاحظه می شود بار رسم $\frac{1}{C_j^r}$ بر حسب V ، با استفاده از شیب نمودار

گرادیان ناخالصی یعنی a و با استفاده از عرض از مبدأ (یعنی $\frac{12 V_{bi}}{q a \epsilon_s^r}$) مقدار V_{bi} بدست می آید.

در واقع با معلوم بودن a کمیت $N(W)$ که در اسلاید قبلی در موردش صحبت شد بدست می آید.