كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الثالثة

المادة : الكترونيات١

المحاضرة : الثالثة/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية

2025

11

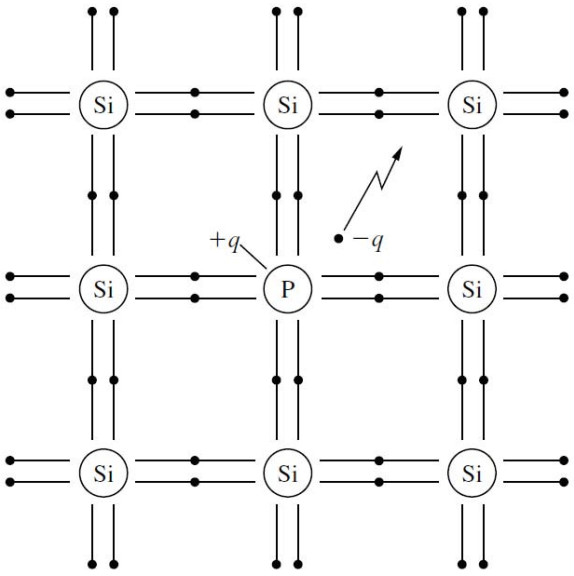
يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر(What's app-Telegram)على الرقم 0931497960

إلكترونيات 1

المحاضرة الثالثة

Impurities In Semiconductors

- تنشأ الفائدة الكبيرة لأنصاف النواقل، عندما يتم أشابتها مع عناصر أخرى، تسمى هذه العملية بعملية الإشابة impurity doping، أو اختصارا doping، ويُدعى النصف ناقل بنصف الناقل المشاب.
- تؤدي عملية الاشابة إلى تغير في قيمة المقاومة النوعية للنصف ناقل ρ.



يوجد إلكترون إضافي متاح عند الإشابة بذرة الفوسفور

EXTRINSIC SEMICONDUCTION

نموذج نصف الناقل من النوع n :

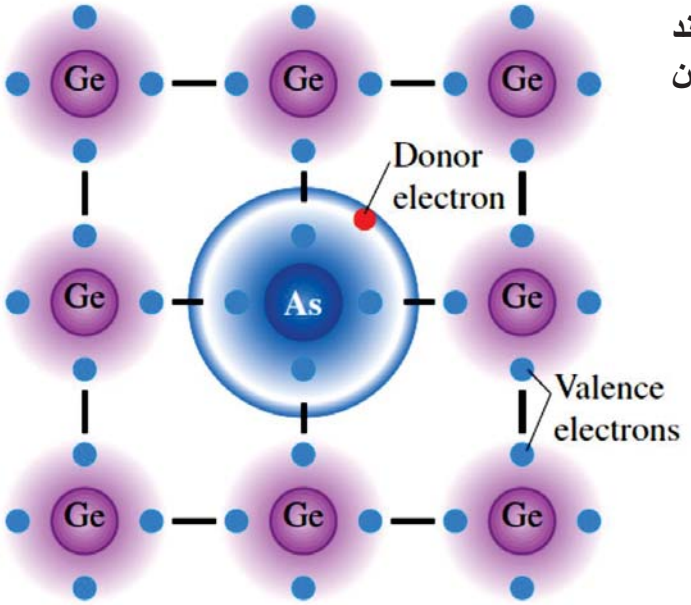
a- ذرة شائبة مثل الفوسفور تمتلك خمس إلكترونات تكافؤ يمكن أن تحل محل ذرة السيليكون وينتج عن ذلك إلكترون ترابط إضافي يرتبط بالذرة الشائبة يدور حولها.

b- عند تحفيز الذرة يصبح إلكترون حر.

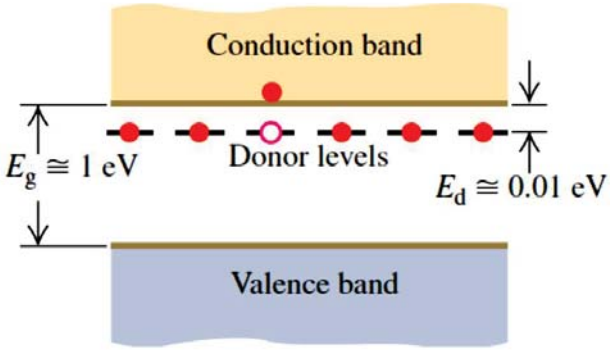
c - حركة هذا الإلكترون الحر تستجيب للحقل الكهربائي.

EXTRINSIC SEMICONDUCTION

تحتوي الذرة الشائبة المانحة ذات النوع n إلكترون تكافؤ خامس لا يشارك في الرابطة التشاركية ويكون ارتباطه ضعيف.

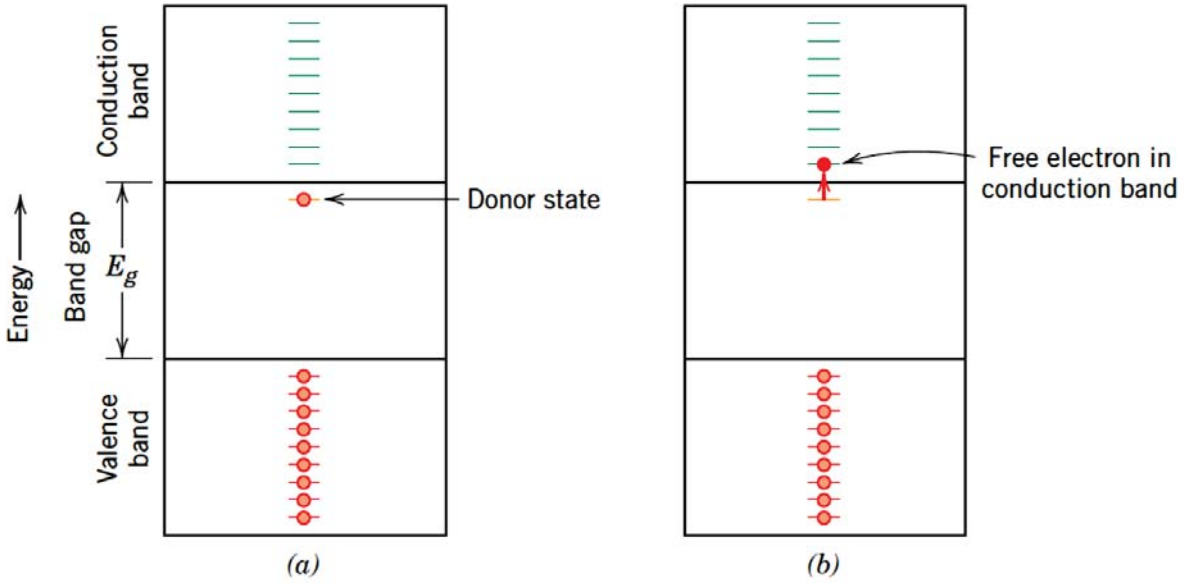


مخطط نطاق الطاقة للنصف ناقل من النوع n عند درجة حرارة منخفضة، تم تحفيز إلكترون من المستويات المانحة إلى نطاق التوصيل.

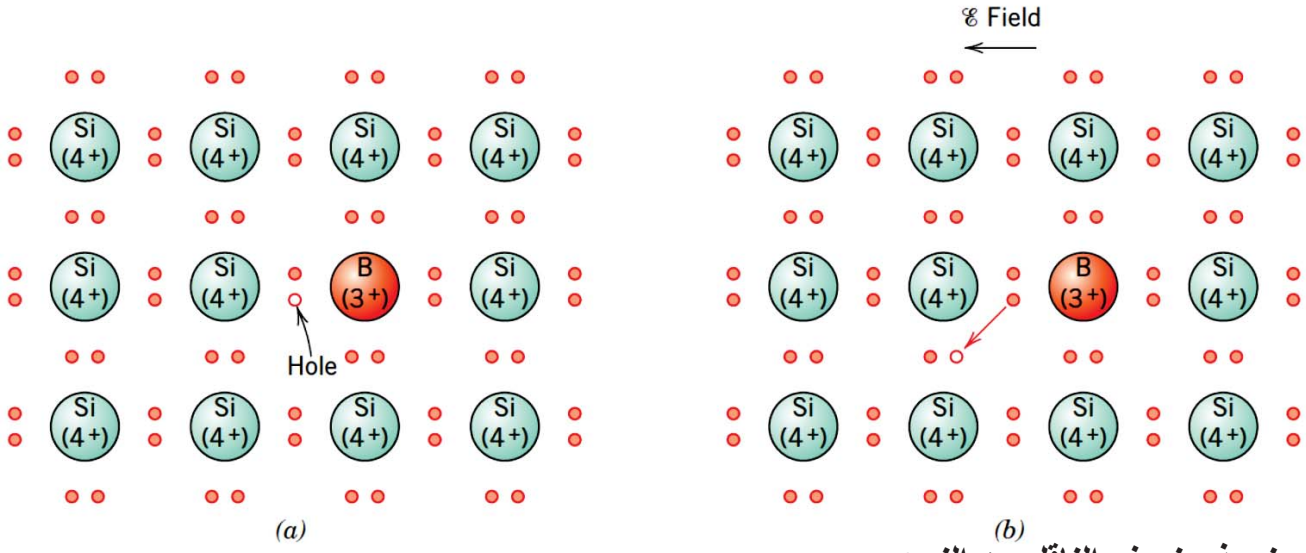


EXTRINSIC SEMICONDUCTION

(a) مخطط نطاق طاقة الإلكترون لسوية الشوائب المانحة الموجود داخل فجوة النطاق تحت الجزء السفلي من نطاق التوصيل .
(b) التحفيز من السوية المانحة يولد إلكترون حر في نطاق التوصيل.



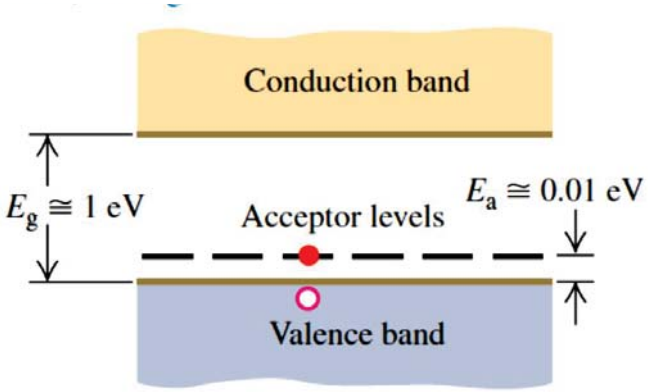
EXTRINSIC SEMICONDUCTION



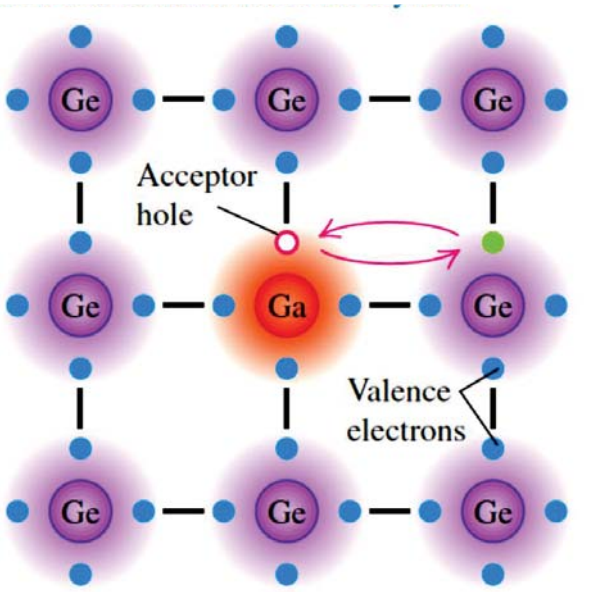
نموذج نصف الناقل من النوع p :
a- يمكن لذرة شائبه مثل البورون التي تحتوي ثلاث إلكترونات تكافؤ أن تحل محل ذرة السيلكون وينتج عن ذلك نقص إلكترون تكافؤ واحد أو ثقب في الذرة الشائبة.
b - حركة هذا الثقب تستجيب للحقل الكهربائي.

EXTRINSIC SEMICONDUCTION

مخطط نطاق الطاقة للنصف ناقل من النوع p عند درجة حرارة منخفضة، أحد مستويات المستقبل قبل إلكترون من نطاق التكافؤ تاركاً مكانه ثقب.

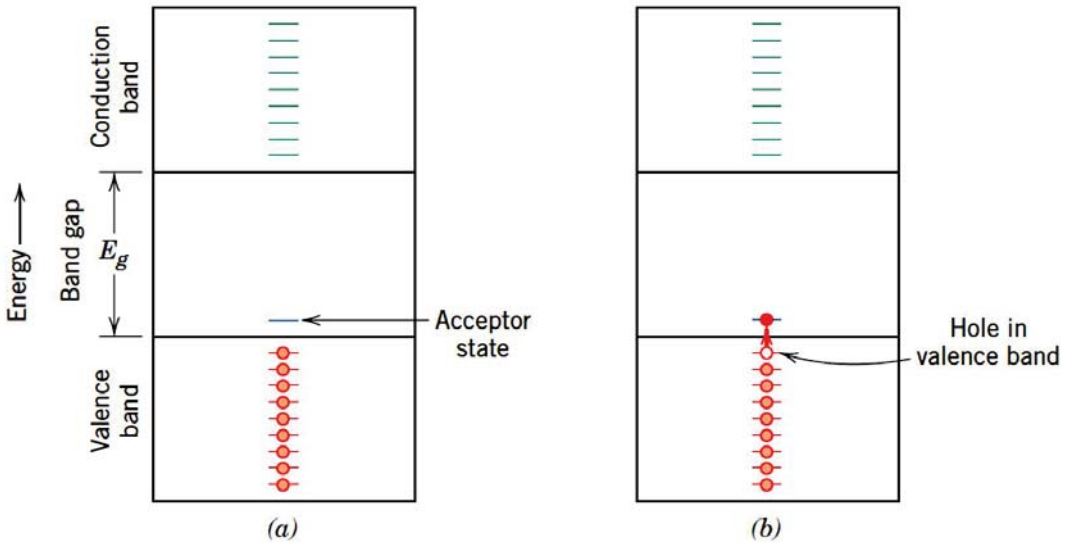


تحتوي الذرة الشائبة المستقبلة ذات النوع p ثلاث إلكترونات تكافؤ فقط لذلك يمكنها استعارة إلكترون من ذرة مجاورة ويكون الثقب الناتج حر الحركة حول البلورة.



EXTRINSIC SEMICONDUCTION

(a) مخطط نطاق الطاقة لسوية الشوائب المستقبلة الموجود داخل فجوة النطاق فوق قمة نطاق التكافؤ.
(b) عند تحفيز الإلكترون ينتقل إلى سوية المستقبل ويترك مكانه ثقب في نطاق التوصيل.



Electron and Hole Concentrations in Doped Semiconductors

- نتيجة لعملية الاشابة فان تركيز الالكترونات والثقوب سوف يتغير، إذا كانت الاشابة من نوع العاطية أي n > p فإن النصف ناقل يُدعى نوع n ***n-type***.
- أما إذا كانت الاشابة من نوع الآخذة، فإن p > n، وتُدعى المادة النصف ناقلة نوع **p-type**.
- الحوامل التي تملك الأكثرية سنسميها بالحوامل الأكثرية **majority carrier**، والحوامل التي لها الأقلية سنسميها بالحوامل الأقلية.
- سنعطي تركيز الالكترونات والثقوب الرموز الآتية:

N_D = **donor impurity concentration** atoms/cm^3

N_A = **acceptor impurity concentration** atoms/cm^3

- بالرغم من الاشابة يجب أن يبقى النصف ناقل حيادي الشحنة **charge neutral**، بمعنى أن مجموع العدد الكلي للشحن الموجبة مع العدد الكلي للشحن السالبة يساوي الصفر. تمثل الشحن العاطية مع الثقوب الشحنة الموجبة، والشحن الآخذة مع الالكترونات الشحنة السالبة.

$$q(N_D + p - N_A - n) = 0$$

- ويجب أن تبقى العلاقة صحيحة من أجل نصف الناقل المشاب في حالة التوازن الحراري

$$pn = n_i^2$$

n-TYPE MATERIAL ($N_D > N_A$)

لدينا المعادلتين الآتيتين:

$$pn = n_i^2$$

$$q(N_D + p - N_A - n) = 0$$

بالتعويض ينتج

$$n^2 - (N_D - N_A)n - n_i^2 = 0$$

$$n = \frac{(N_D - N_A) + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}}{2} \quad \text{and} \quad p = \frac{n_i^2}{n}$$

In practical situations $(N_D - N_A) \gg 2n_i$, and n is given approximately by $n \cong (N_D - N_A)$

p-TYPE MATERIAL ($N_A > N_D$)

For the case of $N_A > N_D$

بالطريقة نفسها نحصل على قيمة p:

$$p = \frac{(N_A - N_D) + \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2}}{2} \qquad \text{and} \qquad n = \frac{n_i^2}{p}$$

$(N_A - N_D) \gg 2n_i$, and p is given approximately by $p \cong (N_A - N_D)$

Practical Doping Levels

في انصاف النواقل نوع n و نوع p يتم تحديد تركيز الحوامل الأكثرية في المصنع من خلال تحديد NA و ND بشكل مستقل عن درجة الحرارة، بالمقابل فإن تركيز الحوامل الأقلية بالرغم من صغرها تتناسب مع n_i^2 وتعتمد بشكل كبير على درجة الحرارة.

For n-type $(N_D > N_A)$: $n \cong N_D - N_A$ $p = \frac{n_i^2}{N_D - N_A}$

For p-type $(N_A > N_D)$: $p \cong N_A - N_D$ $n = \frac{n_i^2}{N_A - N_D}$

Typical values of doping fall in this range:

$$10^{14}/\text{cm}^3 \leq |N_A - N_D| \leq 10^{21}/\text{cm}^3$$

مثال

أوجد نوع وتركيز الإلكترونات والثقوب في عينة السيلكون عند درجة حرارة الغرفة إذا كانت مشابه بالبورون بتركيز $10^{16}/cm^3$ والفوسفور بتركيز $2 * 10^{15}/cm^3$ حيث $n_i = 10^{10}/\text{cm}^3$

$$N_A = 10^{16}/\text{cm}^3 \qquad \text{and} \qquad N_D = 2 \times 10^{15}/\text{cm}^3$$

Since $N_A > N_D$, the material is p-type, and we have $(N_A - N_D) = 8 \times 10^{15}/\text{cm}^3$.

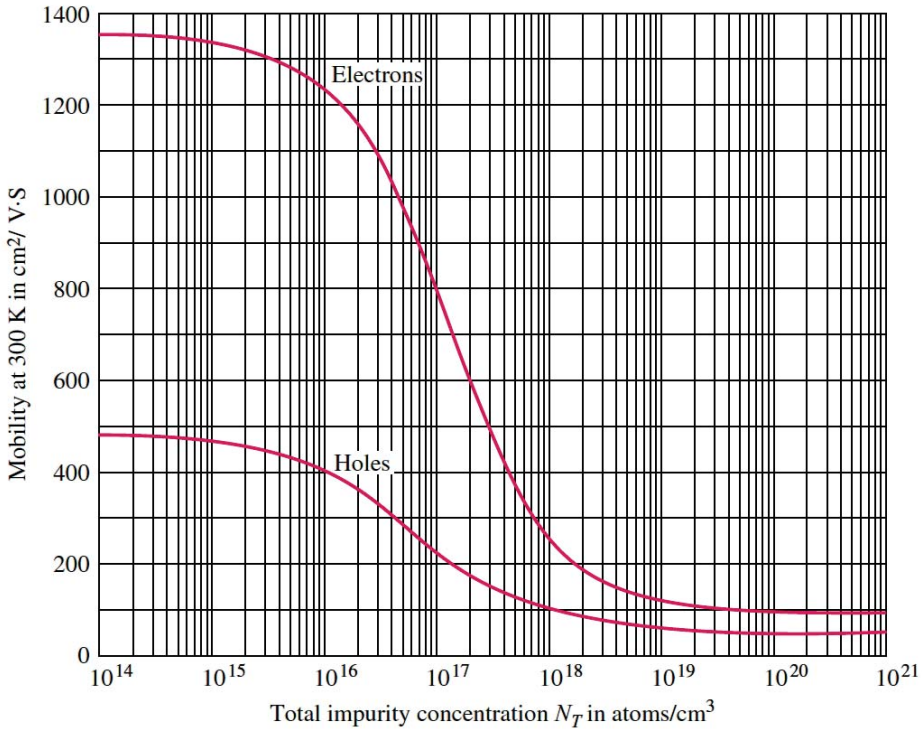
$$p \cong (N_A - N_D) = 8.00 \times 10^{15} \text{ holes/cm}^3$$

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{10^{20}/\text{cm}^6}{8.00 \times 10^{15}/\text{cm}^3} = 1.25 \times 10^4 \text{ electrons/cm}^3$$

$$pn = 10^{20}/\text{cm}^6$$

Mobility and Resistivity in Doped Semiconductors

تؤثر الاشابة على mobility كما يظهر في الشكل:



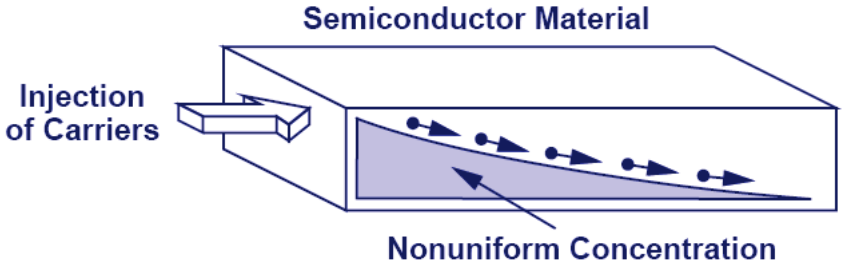
Mobility approximations

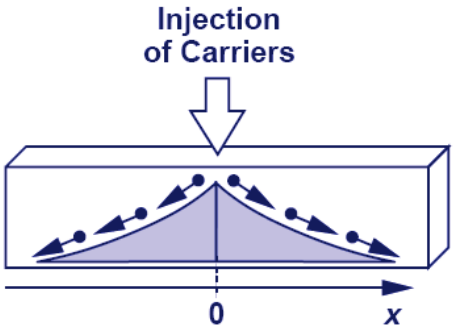
$$\mu_n = 92 + \frac{1270}{1 + \left(\frac{N_T}{1.3 \times 10^{17}}\right)^{0.91}}$$

$$\mu_p = 48 + \frac{447}{1 + \left(\frac{N_T}{6.3 \times 10^{16}}\right)^{0.76}}$$

Dependence of electron and hole mobility on total impurity concentration in silicon at 300 K

الآلية الثانية لانتقال الشحنة: الانتشار





- تنتقل الجسيمات المشحونة من المنطقة ذات التركيز العالي إلى المنطقة ذات التركيز المنخفض.

Current Flow: Diffusion

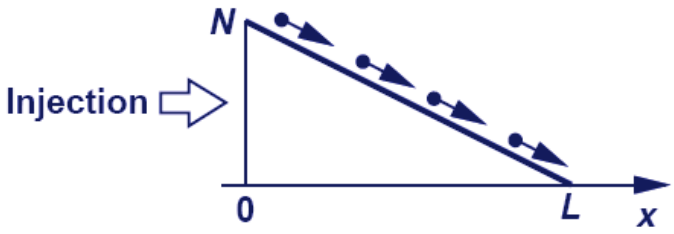
$$I = AqD_n \frac{dn}{dx} \qquad J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

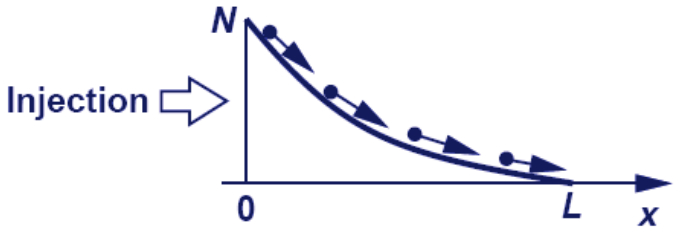
$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} \qquad J_{tot} = q\left(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx}\right)$$

- يتناسب تيار الانتشار مع تدرج الشحنة (dn/dx)على طول اتجاه تدفق التيار.
- كثافة التيار الكلية تتكون من الإلكترونات والثقوب.

يمثل Dn و Dp انتشار الإلكترونات والثقوب بواحدة (cm^2/s).

Example: Linear vs. Nonlinear Charge Density Profile





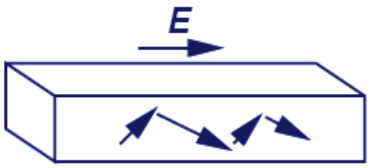
$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} = -qD_n \cdot \frac{N}{L}$$

$$J_n = qD \frac{dn}{dx} = \frac{-qD_n N}{L_d} \exp \frac{-x}{L_d}$$

- تمثل كثافة الشحنة الخطية تيار الانتشار المستمر، بينما تمثل كثافة الشحنة غير الخطية تيار الانتشار المتغير.

Einstein's Relation

Drift Current



$J_n = q \mu_n E$

$J_p = q \mu_p$

Diffusion Current

$J_n = q D_n \frac{dn}{dx}$

$J_n = -q D_p \frac{dp}{dx}$

Diffusivity and mobility are related by **Einstein's relationship**

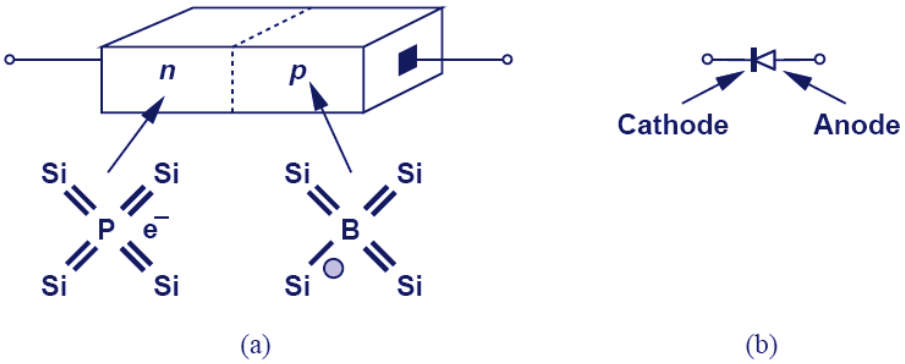
$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} = \frac{D_p}{\mu_p}$$

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q}$$

تُدعى النسبة $(kT/q = V_T)$ بالجهد الحراري ويساوي 25 mV عند درجة حرارة الغرفة.

تتراوح القيم النموذجية للانتشار (التي يشار إليها أيضاً باسم معاملات الانتشار)، بالنسبة للسيلكون 2-35 cm^2/s للإلكترونات و 1-15 cm^2/s للثقوب عند درجة حرارة الغرفة.

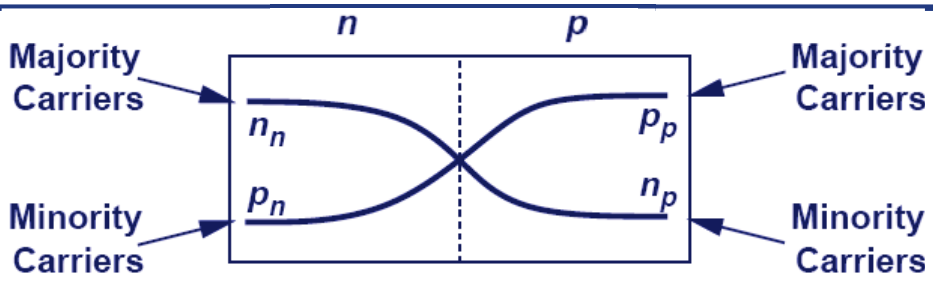
PN Junction (Diode)



- عندما تتم الاشابة من النوع n و p جنباً إلى جنب في نصف الناقل تتشكل وصلة PN أو الديود.
- لفهم عمل الصمام الثنائي (الديود) يجب دراسة مناطق العمل الثلاث: التوازن والإنحياز العكسي والإنحياز الأمامي.

PN Junction in Equilibrium		PN Junction Under Reverse Bias		PN Junction Under Forward Bias
• Depletion Region • Built−in Potential	⇨	• Junction Capacitance	⇨	• I/V Characteristics

Current Flow Across Junction: Diffusion



n_n : Concentration of electrons on n side

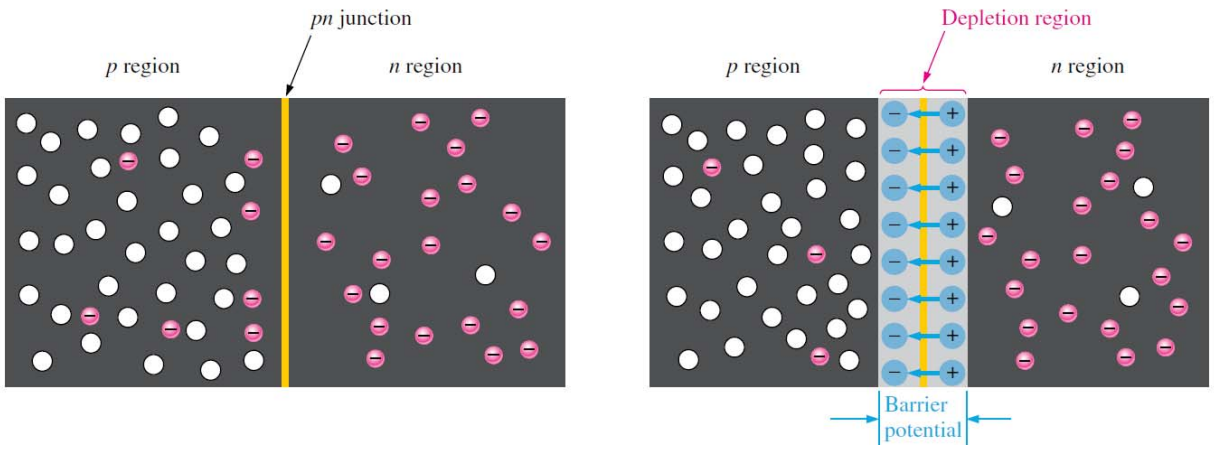
p_n : Concentration of holes on n side

p_p : Concentration of holes on p side

n_p : Concentration of electrons on p side

- بما أن كل من جانبي الوصلة يحتوي فائض من الثقوب أو الإلكترونات مقارنة بالجانب الآخر، ينشأ تدرج كبير بالتركيز يؤدي إلى تدفق تيار الانتشار عبر الوصلة من كلا الجانبين.

THE PN JUNCTION



عند تشكيل الوصلة pn، فإن المنطقة n تخسر الكترونات من خلال الانتشار diffusion (فرق في التركيز) عبر الوصلة pn، هذا يؤدي إلى انشاء طبقة من الشحن الموجبة بالقرب من الوصلة.

بشكل مشابه لانتشار الالكترونات، فإن الثقوب تنتشر من المنطقة p عبر الوصلة، مشكلة طبقة الشحن السالبة بالقرب من الوصلة، تُسمى المنطقة الناشئة بالمنطقة المحرمة depletion region أو منطقة النضوب.

تشكل هذه المنطقة بما يُعرف بالحاجز الكموني Barrier potential.

THE PN JUNCTION

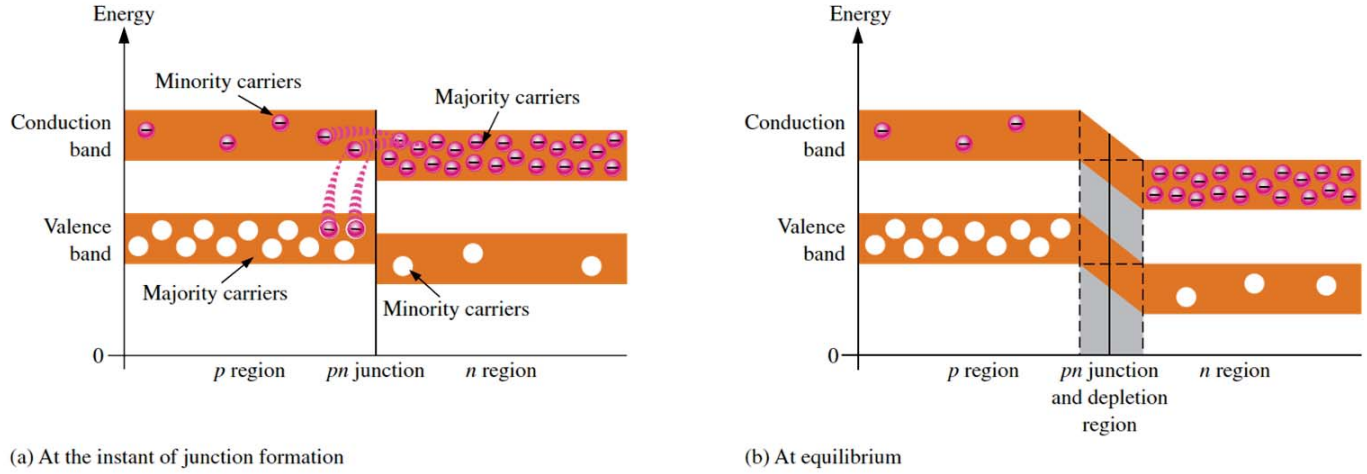
- تتوسع المنطقة المحرمة خلال الزمن، حتى تصل حالة التوازن، بحيث لا يوجد انتشار للالكترونات والثقوب. ويبقى عرض هذه المنطقة ثابتاً.
- نتيجة لوجود شحن متعاكسة على طرفي هذه المنطقة فإنه ينشأ حقل كهربائي، اتجاهه من الشحن الموجبة إلى الشحن السالبة. يُشكل الحقل الكهربائي حاجزاً أمام عبور الالكترونات، مما يتطلب طاقة إضافية للإلكترون لعبور المنطقة المحرمة.
- قيمة فرق الكمون بين طرفي المنطقة يساوي الجهد اللازم تطبيقه لعبور الإلكترون المنطقة المحرمة. تختلف قيمة هذا الجهد من نصف ناقل إلى آخر، بالنسبة للسيلكون يساوي 0.7 V، وبالنسبة للجرمانيوم يساوي 0.3 V عند حرارة الغرفة.

Energy Diagrams of the *PN Junction and Depletion Region*

عادة تكون مستويات الطاقة (التكافؤ والتوصيل) بالنسبة للمنطقة n أقل من مستويات الطاقة للمنطقة p.

تنتشر الالكترونات التي تحمل طاقة كافية من المنطقة n إلى المنطقة p، عند وصولها المنطقة p تفقد طاقتها، بالتالي تنتقل من حزمة التوصيل إلى حزمة التكافؤ.

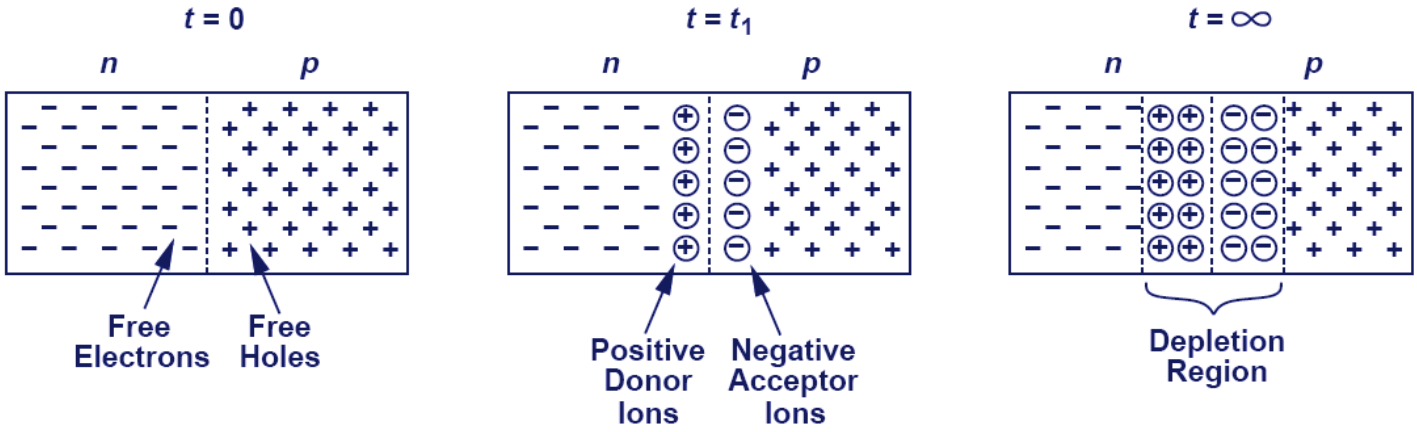
مع استمرار الانتشار تتشكل المنطقة المحرمة، وينخفض مستوى الطاقة للمنطقة n (حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل) نتيجة لخسارتها للالكترونات التي تملك الطاقة والتي عبرت إلى المنطقة .



(a) At the instant of junction formation

(b) At equilibrium

Depletion Region



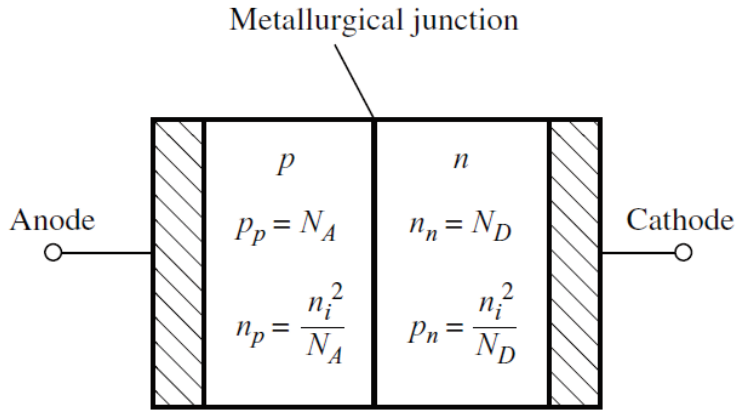
- مع انتشار الإلكترونات الحرة والثقوب عبر الوصلة تترك خلفها منطقة من الأيونات تسمى منطقة النضوب.

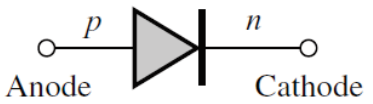
pn JUNCTION ELECTROSTATICS

$N_A = 10^{17}/\text{cm}^3 \qquad N_D = 10^{16}/\text{cm}^3$

p-type side: $p_p = 10^{17}$ holes/cm^3 $\qquad n_p = 10^3$ electrons/cm^3

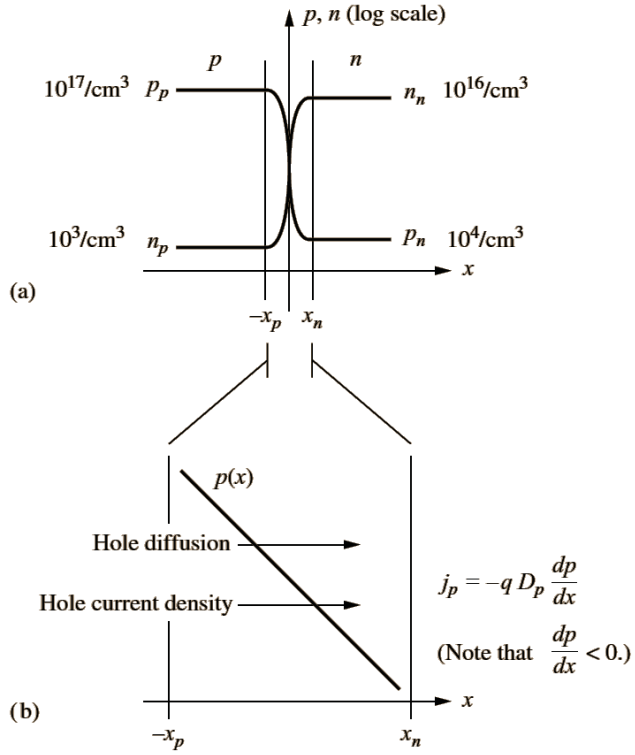
n-type side: $p_n = 10^4$ holes/cm^3 $\qquad n_n = 10^{16}$ electrons/cm^3

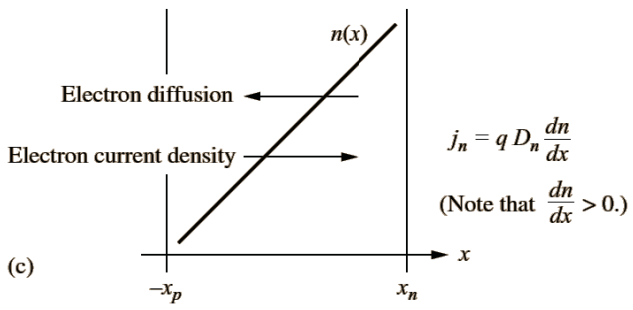




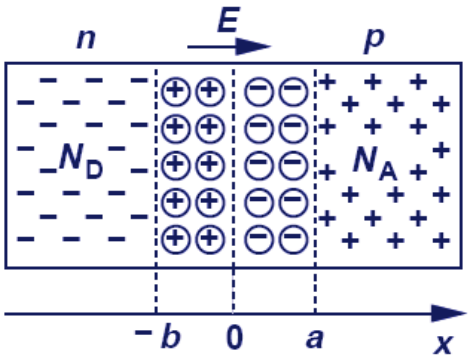
pn JUNCTION ELECTROSTATICS

(a) تركيز حوامل الشحنة.
(b) تيار انتشار الثقوب.
(c) تيار انتشار الإلكترونات.

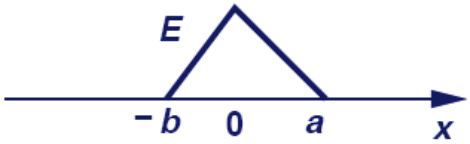


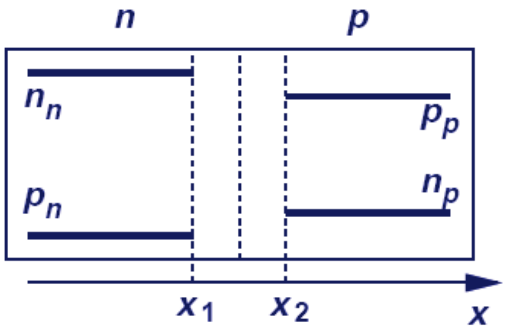


Current Flow Across Junction: Drift & Equilibrium



- ينشأ عن الأيونات في منطقة النضوب مجالاً كهربائياً يؤدي إلى تيار انجراف.





- في حال التوازن يلغي تيار الانجراف تيار الانتشار المتدفق بالاتجاه المعاكس.

$$I_{drift,p} = I_{diff,p}$$
$$I_{drift,n} = I_{diff,n}$$

Built-in Potential

- بسبب الحقل الكهربائي عبر الوصلة ينشأ جهد كامن، ويتم اشتقاقه كما في الشكل الآتي.

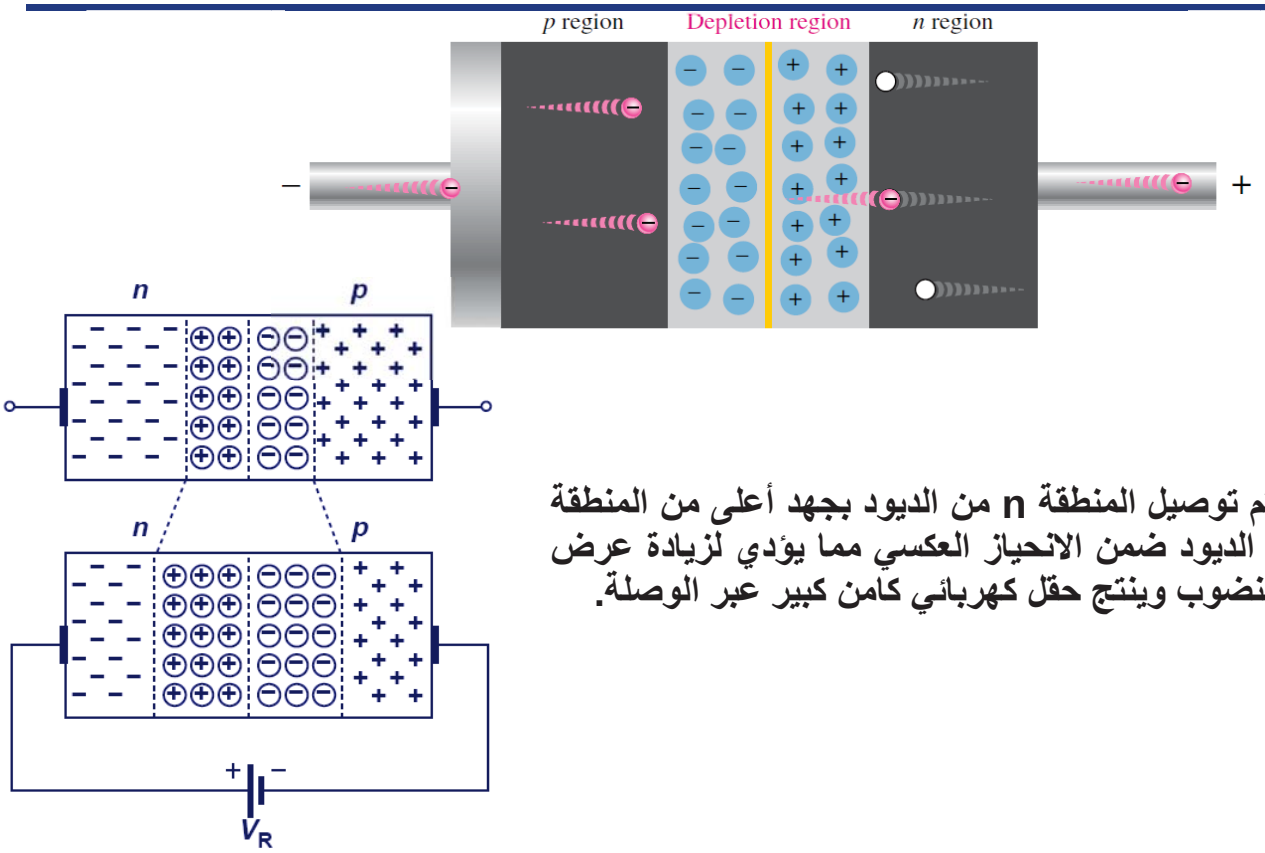
$$I_{drift,p} = I_{diff,p}$$
$$I_{drift,n} = I_{diff,n}$$

$$q\mu_p pE = -qD_p \frac{dp}{dx} \qquad -\mu_p p\frac{dV}{dx} = -D_p \frac{dp}{dx}$$

$$\mu_p \int_{x_1}^{x_2} dV = D_p \int_{p_p}^{p_n} \frac{dp}{p} \qquad V(x_2) - V(x_1) = \frac{D_p}{\mu_p} \ln \frac{p_p}{p_n}$$

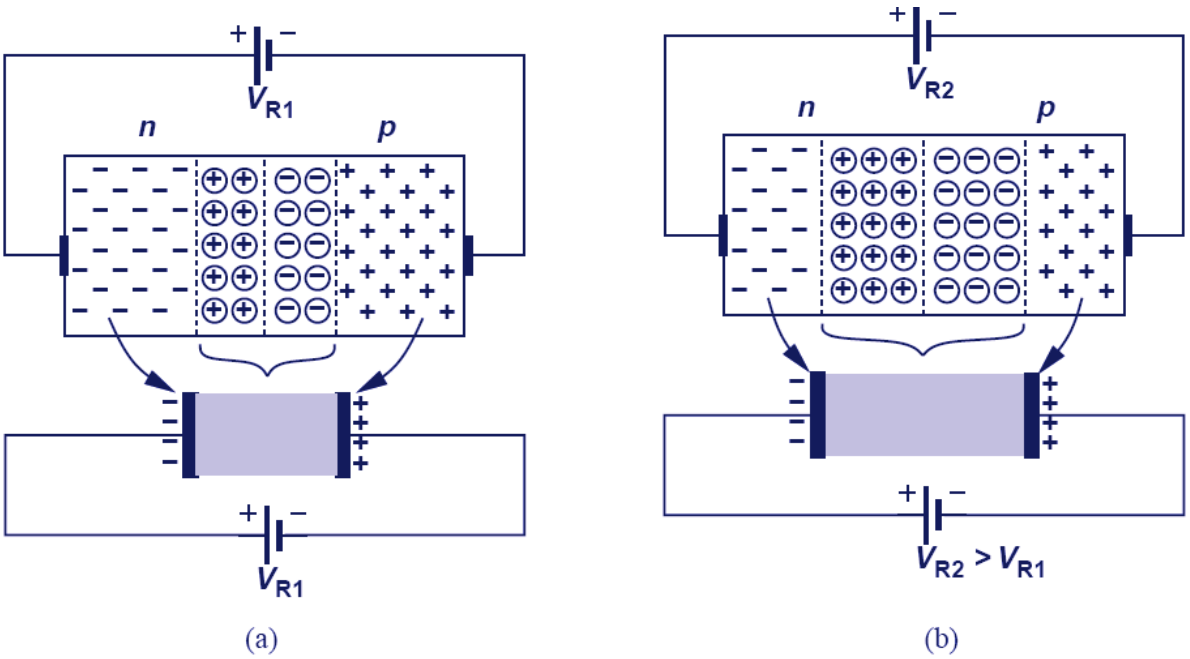
$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n}, V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

Diode in Reverse Bias



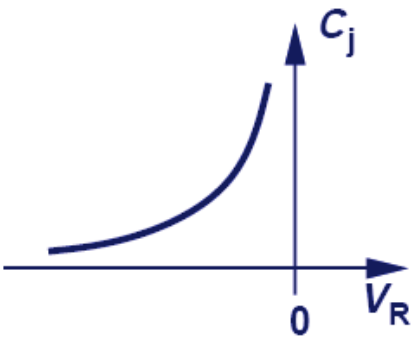
عندما يتم توصيل المنطقة n من الديود بجهد أعلى من المنطقة p يكون الديود ضمن الانحياز العكسي مما يؤدي لزيادة عرض منطقة النضوب وينتج حقل كهربائي كامن كبير عبر الوصلة.

Reverse Biased Diode's Application: Voltage-Dependent Capacitor



- عند تحييز الديود بشكل عكسي تعمل الوصلة PN كمكثف، من خلال تغيير الجهد المطبق بالاتجاه العكسي يتغير عرض منطقة النضوب مما يغير قيمة السعة، بذلك يكون الاتصال PN مكثف يعتمد على الجهد.

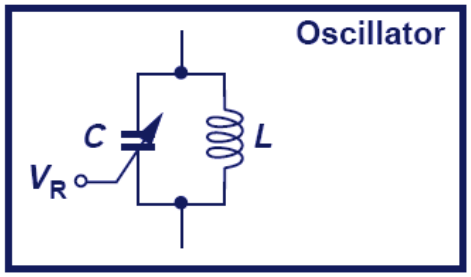
Voltage-Dependent Capacitance



$$C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1+\frac{V_R}{V_0}}}$$

$$C_{j0} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{si} q}{2} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \frac{1}{V_0}}$$

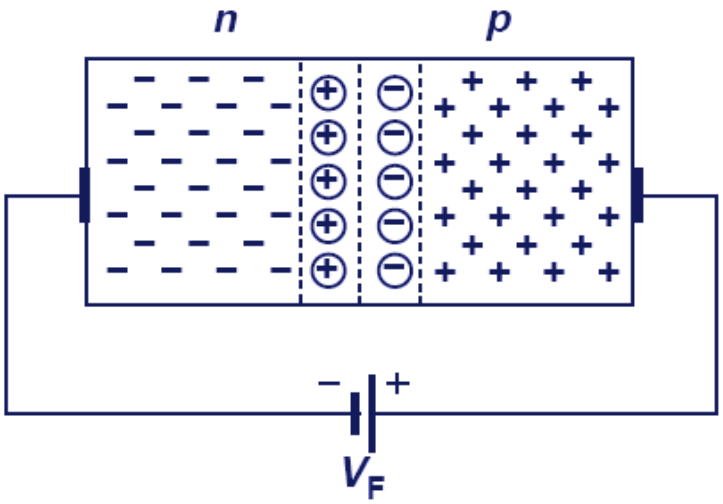
- توضح المعادلة طريقة حساب السعة التي تعتمد على الجهد المطبق.



- من أهم تطبيقات وصلة PN المنحازة عكسياً هو VCO ، حيث يمكننا تغيير السعة من خلال التحكم بالجهد المطبق والذي بدوره يؤدي لتغيير قيمة التردد.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

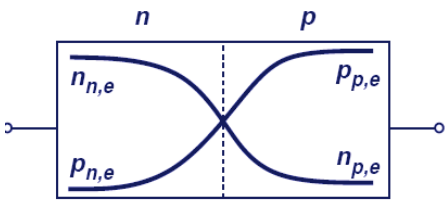
Diode in Forward Bias

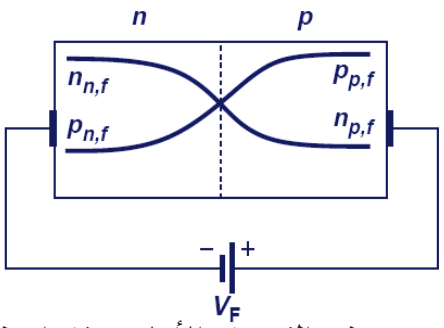


عندما يتم توصيل المنطقة p من الديود بجهد أعلى من المنطقة n يكون الديود ضمن الانحياز الأمامي مما يؤدي لتقليل عرض منطقة النضوب وتنخفض قيمة الحقل الكهربائي الكامن عبر الوصلة.

Minority Carrier Profile in Forward Bias

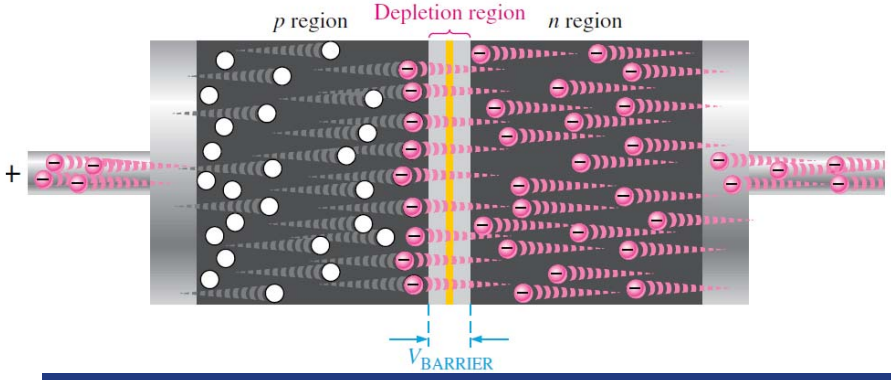
$$p_{n,e} = \frac{p_{p,e}}{\exp\frac{V_0}{V_T}}$$





$$p_{n,f} = \frac{p_{p,f}}{\exp\frac{V_0 - V_F}{V_T}}$$

- عند التحييز الأمامي تزداد ناقلات الشحنة الأقلية في كل منطقة بسبب انخفاض الحقل الكامن لذلك تزداد تيارات الانتشار لتزويد حاملات الشحنة الأقلية.



يوضح الشكل الانحياز الأمامي للديود وتدفق حاملات الشحنة الأكثرية والجهد خلال الحاجز الكامن عبر منطقة النضوب .

Diffusion Current in Forward Bias

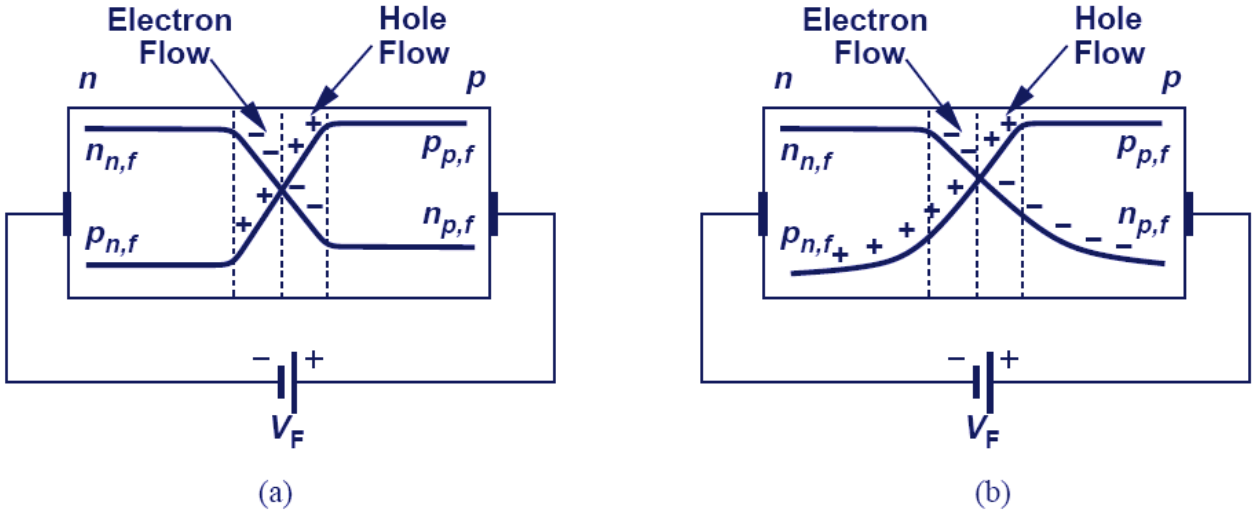
$$\Delta n_p \approx \frac{N_D}{\exp\frac{V_0}{V_T}}(\exp\frac{V_F}{V_T} - 1) \qquad \Delta p_n \approx \frac{N_A}{\exp\frac{V_0}{V_T}}(\exp\frac{V_F}{V_T} - 1)$$

$$I_{tot} \propto \frac{N_A}{\exp\frac{V_0}{V_T}}(\exp\frac{V_F}{V_T} - 1) + \frac{N_D}{\exp\frac{V_0}{V_T}}(\exp\frac{V_F}{V_T} - 1)$$

$$I_{tot} = I_s(\exp\frac{V_F}{V_T} - 1) \qquad I_s = Aqn_i^2(\frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{N_D L_p})$$

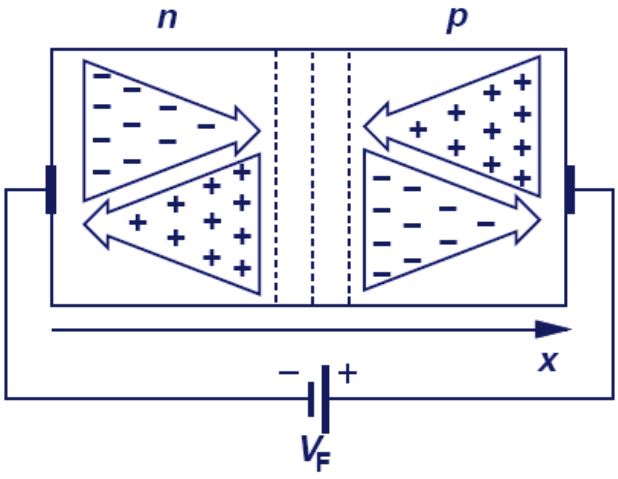
- يزداد تيار الانتشار لتوفير الزيادة في حاملات الشحنة الأقلية.

Minority Charge Gradient



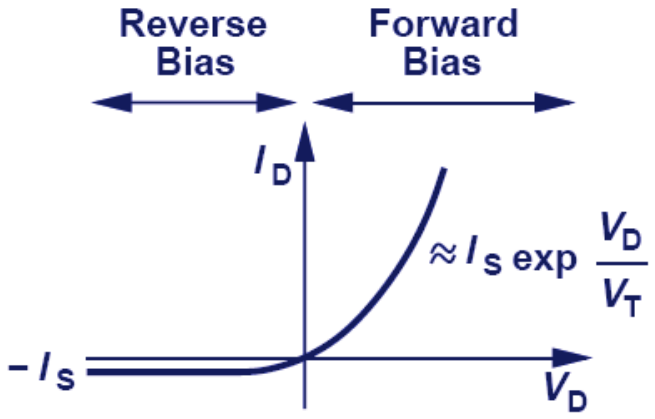
- لا يجب أن يكون منحني حاملات الشحنة الأقلية ثابتاً على طول المحور x ، وبخلاف ذلك لا يوجد تدرج تركيز أو تيار انتشار.
- اتحاد حاملات الشحنة الأقلية مع حاملات الشحنة الأكثرية هو سبب اسقاط حاملات الشحنة الأقلية عند دخولها للمنطقة n أو p

Forward Bias Condition: Summary



- في الانحياز الأمامي يوجد تيار انتشار كبير لحاملات الشحنة الأقلية عبر الوصلة، ومع ذلك عندما نتعمق أكثر في المنطقة n وp نجد التيارات الناتجة عن اتحاد حاملات الشحنة الاقلية بالأكثرية، ويضيف هذين التيارين قيمة ثابتة.

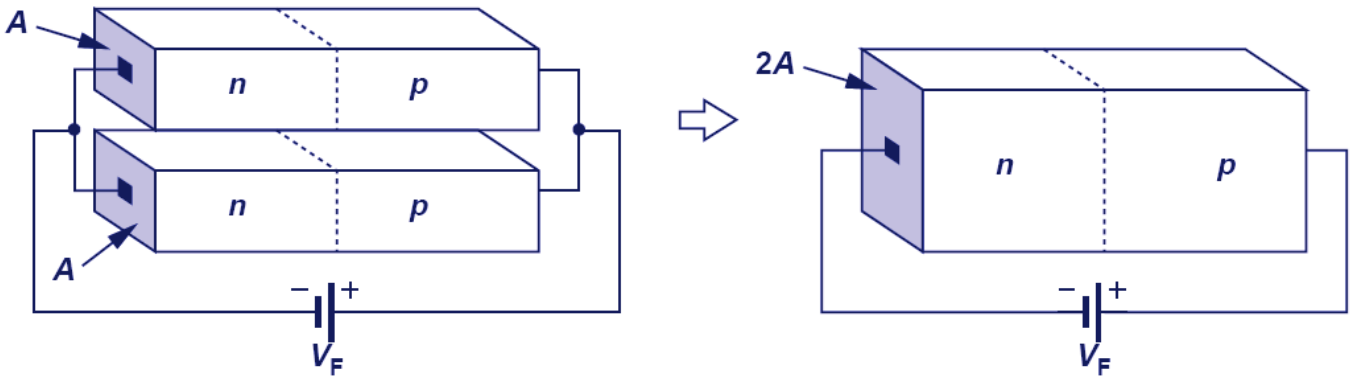
IV Characteristic of PN Junction



$$I_D = I_S(\exp\frac{V_D}{V_T} - 1)$$

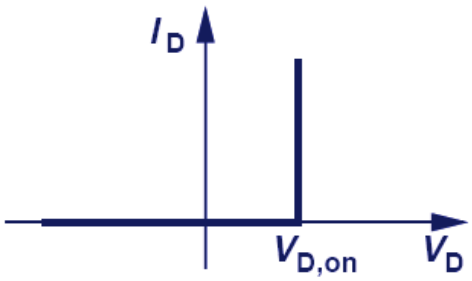
- علاقة الجهد والتيار للوصلة pn أسّيه في الانحياز الأمامي وثابتة نسبياً في الانحياز العكسي.

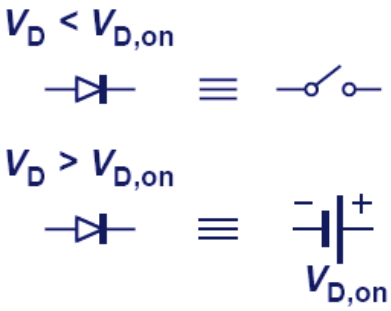
Parallel PN Junctions



- بما أن تيارات الوصلة pn تتناسب مع مساحة المقطع العرضي للوصلة، بالتالي وضع تقاطعين pn على التوازي يشكلان تقاطع واحد بمساحة مقطع عرضي مضاعفة، ويمر ضعف التيار.

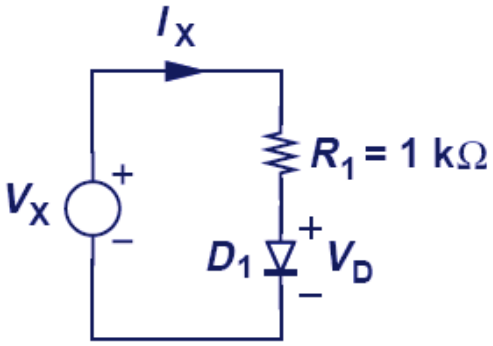
Constant-Voltage Diode Model





- يعمل الديود كدارة مفتوحة إذا كان الجهد المطبق عليه أقل من جهد العتبة ويكون مصدر جهد ثابت إذا كان الجهد المطبق عليه أكبر من جهد العتبة.

مثال:

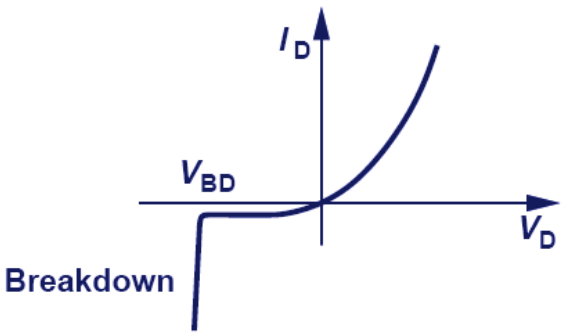


$$V_X = I_X R_1 + V_D = I_X R_1 + V_T \ln \frac{I_X}{I_S}$$

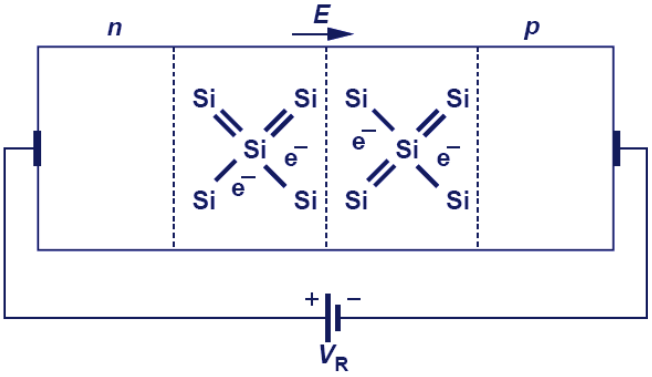
$$I_X = 2.2mA \quad for \quad V_X = 3V$$

$$I_X = 0.2mA \quad for \quad V_X = 1V$$

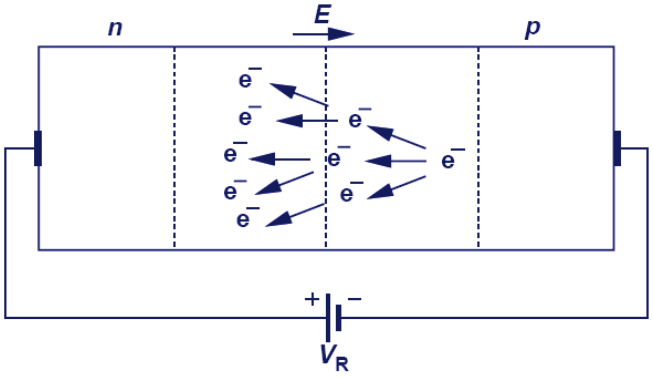
Reverse Breakdown



- عند تطبيق جهد انحياز عكسي كبير على الديود يحدث انهيار ويمر تيار كبير.
- يحصل انهيار زينر نتيجة للحقل الكهربائي الكبير داخل منطقة النضوب الذي يؤدي لكسر الرابط التشاركية، وهذا الانهيار يحصل نتيجة اصطدام الإلكترونات أو الثقوب مع الأيونات الثابتة ضمن منطقة النضوب .

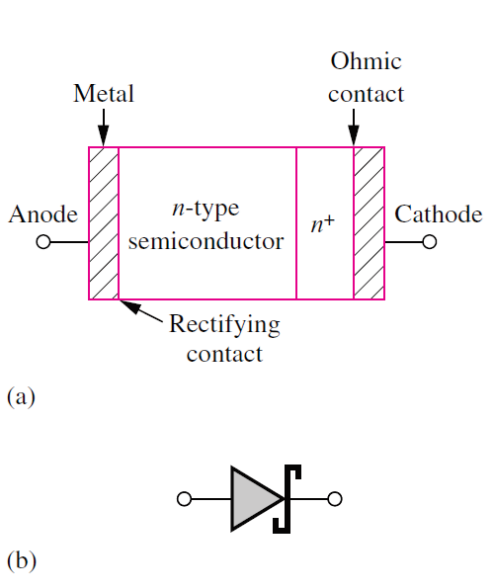


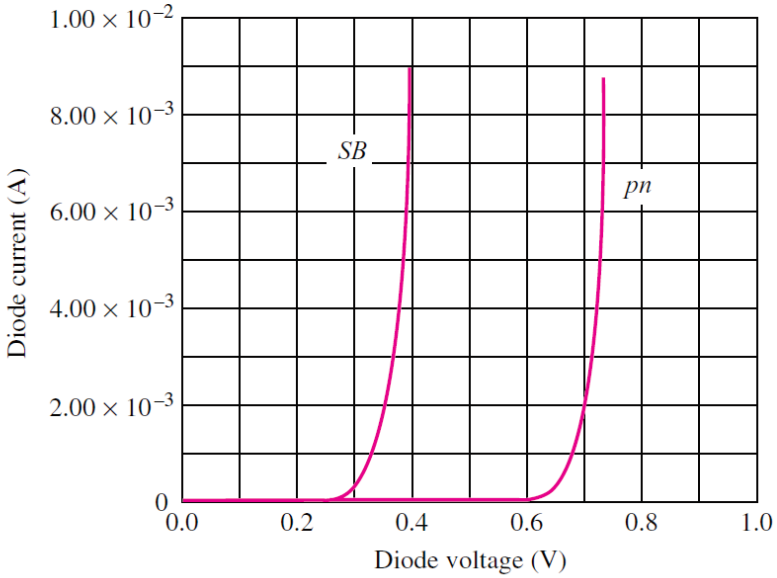
(a)



(b)

Schottky Barrier Diode





أشكال الديود