

S6e APP1 - Proc 2

E.1 Dopage et porteurs dans les semiconducteurs

- Quelles est la densité intrinsèque de porteurs dans le silicium à 300K et à 75°C (intérieur d'un boîtier pendant opération) ?
- Quel facteur a la plus grande contribution ($T^{3/2}$ ou l'exponentielle) ?

E.1 Dopage et porteurs dans les semiconducteurs

- On dope le silicium avec du phosphore à une concentration $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$.
- Quel est le type de porteurs majoritaires ? Et des minoritaires ?
- Quelle est la concentration des porteurs majoritaires ?
- Et des minoritaires ?

Tableau Périodique des Éléments

1 1A New Original																		18 VIIIA
1 H Hydrogène 1.00784	2 He Hélium 4.002602											13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA		
3 Li Lithium 6.941	4 Be Béryllium 9.012182											5 B Bore 10.811	6 C Carbone 12.0107	7 N Azote 14.00674	8 O Oxygène 15.9994	9 F Fluor 18.9984032	10 Ne Néon 20.1797	
11 Na Sodium 22.989770	12 Mg Magnésium 24.3050	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8	9 VIIIB	10	11 IB	12 IIB	13 Al Aluminium 26.981538	14 Si Silicium 28.0855	15 P Phosphore 30.973761	16 S Soufre 32.066	17 Cl Chlore 35.453	18 Ar Argon 39.948	
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955910	22 Ti Titane 47.867	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chrome 51.9961	25 Mn Manganèse 54.938049	26 Fe Fer 55.8457	27 Co Cobalt 58.933200	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Cuivre 63.546	30 Zn Zinc 65.409	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.64	33 As Arsenic 74.92160	34 Se Sélénium 78.96	35 Br Brome 79.904	36 Kr Krypton 83.798	
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90585	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybdène 95.94	43 Tc Technétium (98)	44 Ru Ruthénium 101.07	45 Rh Rhodium 102.90550	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Argent 107.8682	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Étain 118.710	51 Sb Antimoine 121.760	52 Te Tellure 127.60	53 I Iode 126.90447	54 Xe Xénon 131.293	
55 Cs Césium 132.90545	56 Ba Baryum 137.327	57 to 71		72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantale 180.9479	74 W Tungstène 183.84	75 Re Rhénium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platine 195.078	79 Au Or 196.96655	80 Hg Mercure 200.59	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Plomb 207.2	83 Bi Bismuth 208.98038	84 Po Polonium (209)	85 At Astate (210)	86 Rn Radon (222)
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 to 103		104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (269)	109 Mt Meitnerium (268)	110 Ds Darmstadtium (271)	111 Rg Roentgenium (272)	112 Uub Ununbium (285)	113 Uut Ununtrium (284)	114 Uuq Ununquadium (289)	115 Uup Ununpentium (288)	116 Uuh Ununhexium (292)	117 Uus Ununseptium (294)	118 Uuo Ununoctium (294)

Atomic masses in parentheses are those of the most stable or common isotope.

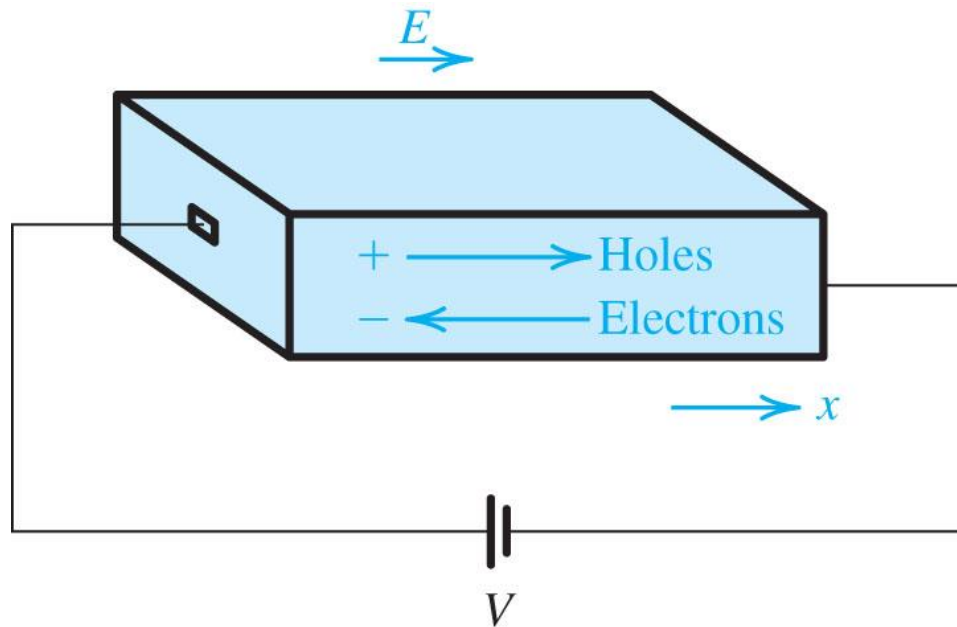
Design Copyright © 1997 Michael Dayah (michael@dayah.com), <http://www.dayah.com/periodic/>

Note: The subgroup numbers 1-18 were adopted in 1984 by the International Union of Pure and Applied Chemistry. The names of elements 112-118 are the Latin equivalents of those numbers.

57 La Lanthane 138.9055	58 Ce Cérium 140.116	59 Pr Praséodyme 140.90765	60 Nd Néodyme 144.24	61 Pm Prométhium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.93421	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutécium 174.967
89 Ac Actinium (227)	90 Th Thorium 232.0381	91 Pa Protactinium 231.03588	92 U Uranium 238.02891	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Américium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkélium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobélium (259)	103 Lr Lawrencium (262)

Courant de dérivation

C'est le courant généré par un champ électrique.
Y a-t-il d'autres manières de générer du courant?



$$J_S = J_{S,p} + J_{S,n} = q(p\mu_p + n\mu_n)E \quad \text{Eq. 3.13}$$

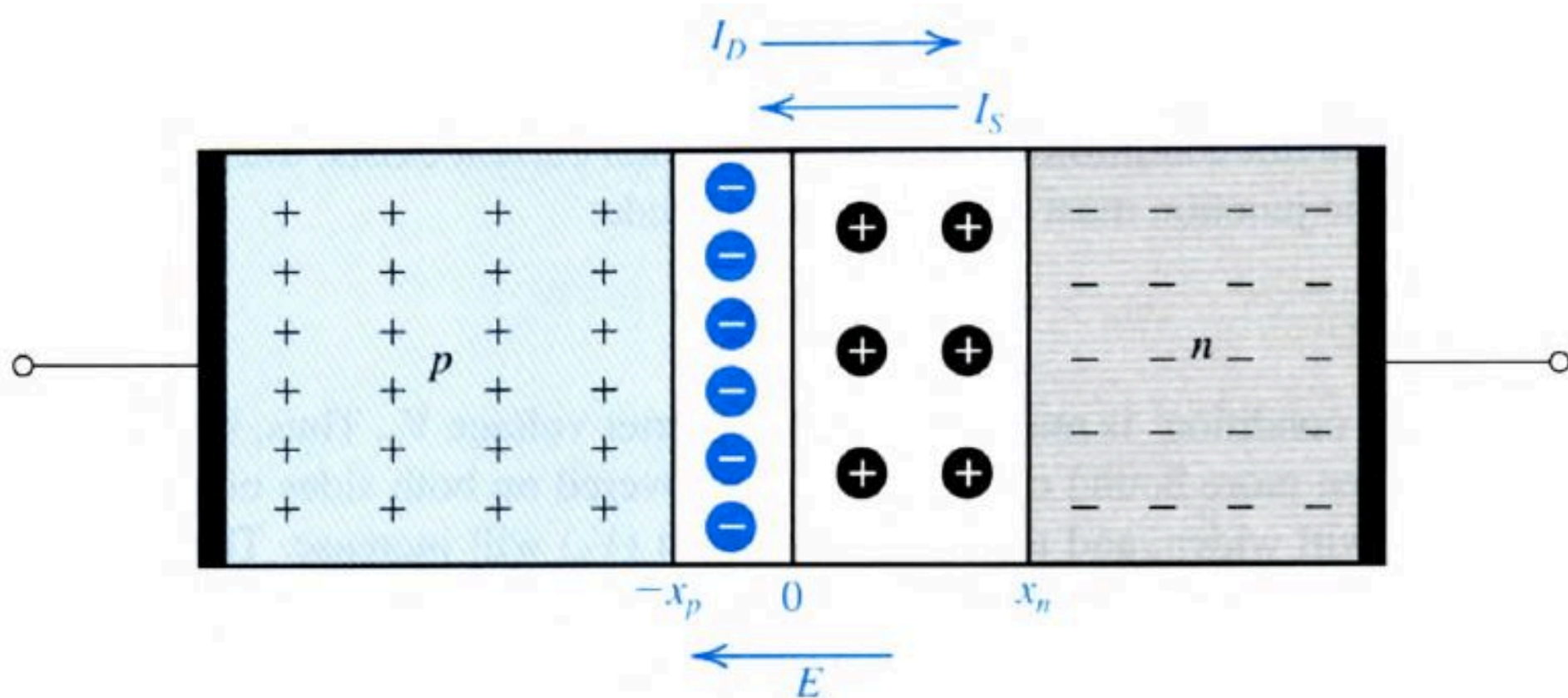
$$\rho = \frac{1}{q(p\mu_p + n\mu_n)} \quad \text{Eq. 3.15}$$

Figure 3.5 An electric field E established in a bar of silicon causes the holes to drift in the direction of E and the free electrons to drift in the opposite direction. Both the hole and electron drift currents are in the direction of E .

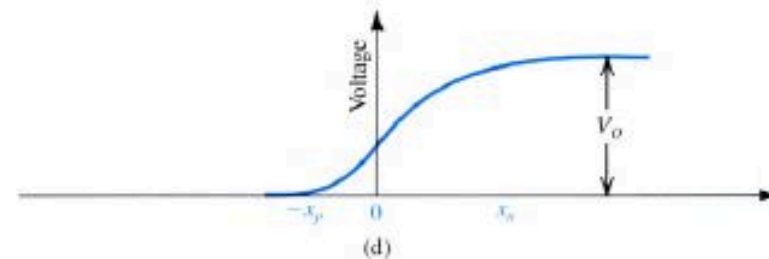
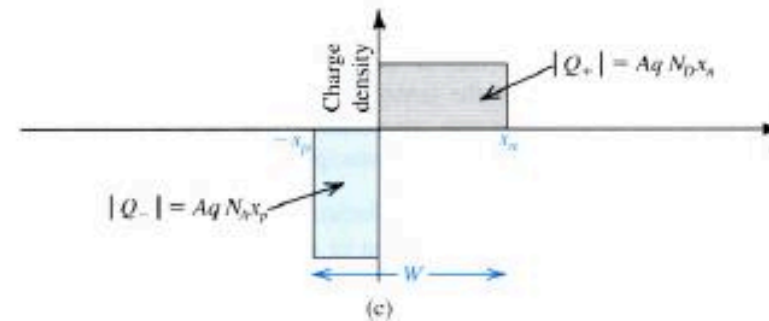
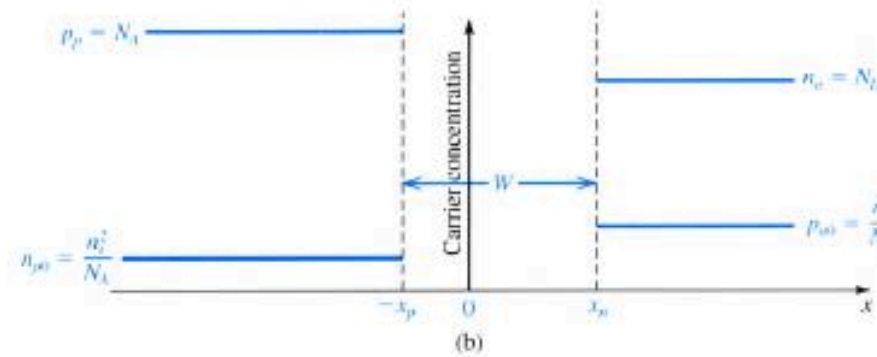
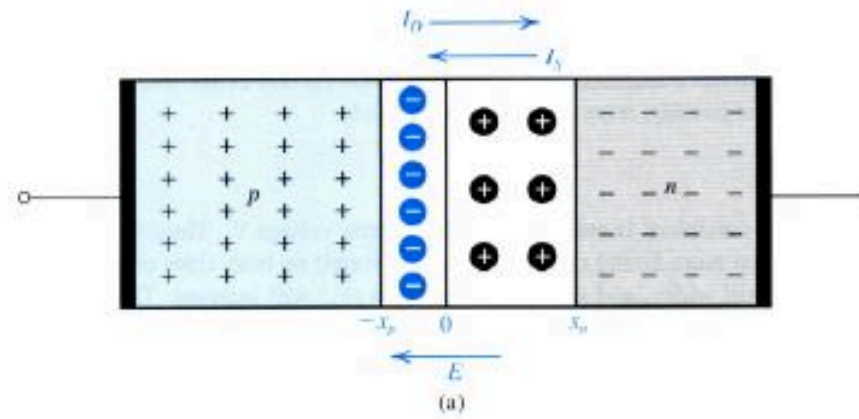
E.2 Courant de dérivation

- Quelles est la résistance d'un barreau de silicium intrinsèque de $100 \times 10 \times 1 \text{ } \mu\text{m}^3$ (longueur, largeur, épaisseur) ?
- Quelles est la résistance de ce même barreau de silicium si il est dopé de type p à raison de $N_a = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$? Attention, la mobilité des porteurs est réduite par le dopage !
- Quelles est la conductivité de ce barreau ?
- Quelle est la contribution à la conductivité (ratio) des porteurs minoritaires par rapport aux porteurs majoritaires ?
- Si on applique une tension de 10 V entre les deux bouts du barreau de silicium intrinsèque (sens de la longueur), quelle est la vitesse des trous ?
- Est-ce que cette vitesse est différente pour le barreau de silicium dopé et est-ce que cette différence explique sa plus forte conductivité ?

Jonction pn : le coeur de la diode



Jonction pn : le coeur de la diode



E.3 Jonction pn : le cœur de la diode

Soit une diode formée d'une jonction abrupte de dopage $N_d = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ et $N_a = 10^{18} \text{cm}^{-3}$.

- Quel est le potentiel de contact (i.e. "built-in voltage") de cette jonction ?
- Quelle est la largeur de la zone de déplétion ?
- Quel est le champ électrique maximal à la jonction métallurgique (i.e. interface entre type p et type n) sachant que pour une jonction abrupte fortement dopée d'un seul côté il est donné par

$$\mathcal{E}_{max} = \frac{2V_0}{W}$$

Révision : Matière partiellement couverte en S1 et S2 (ch 9, Hambley).

Jonction pn polarisée : courbe caractéristique de la diode

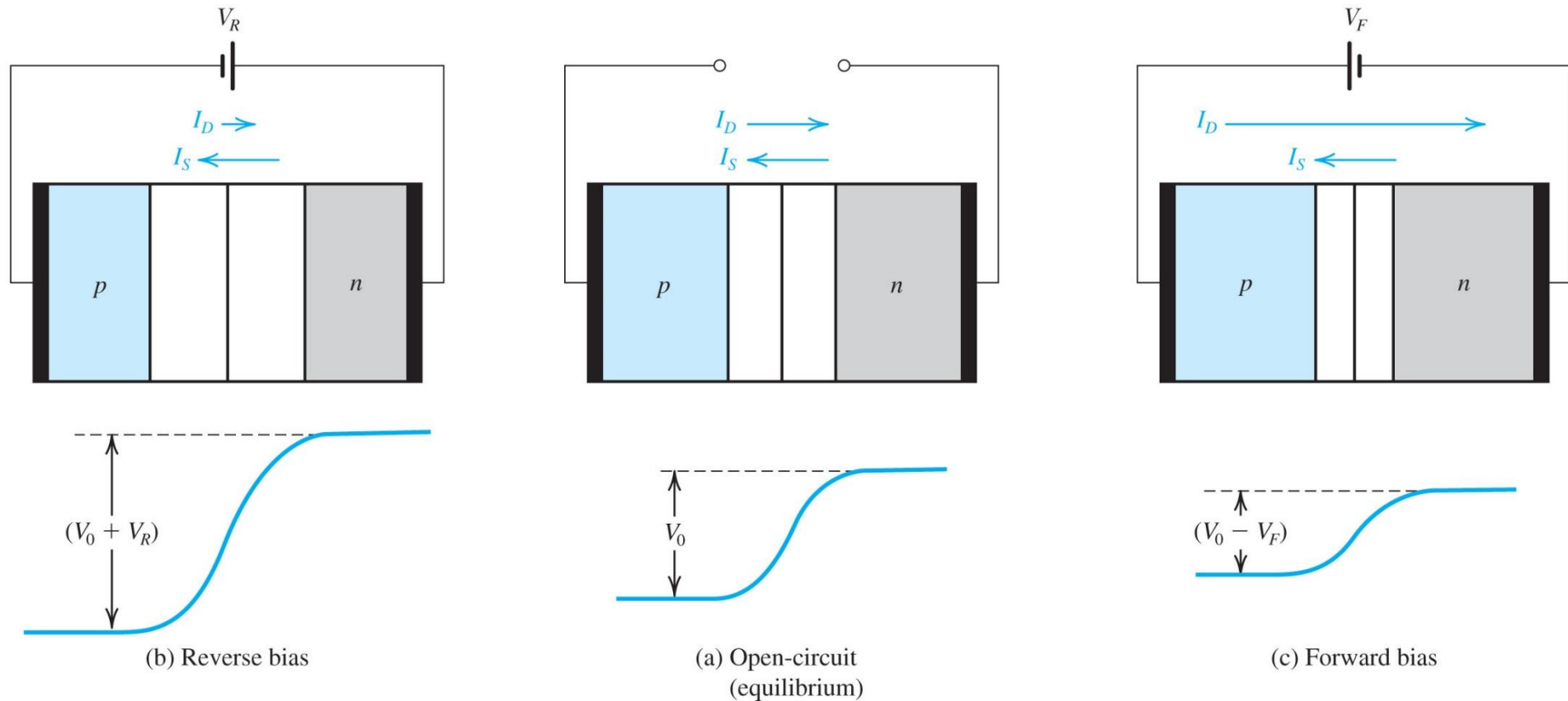


Figure 3.11 The *pn* junction in: (a) equilibrium; (b) reverse bias; (c) forward bias.

E.4 Jonction pn polarisée : courbe caractéristique de la diode

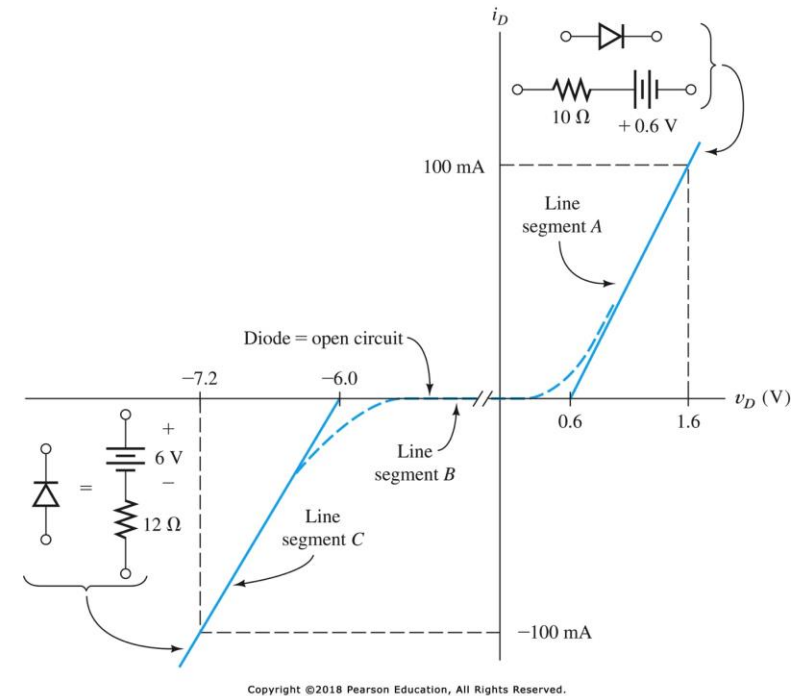
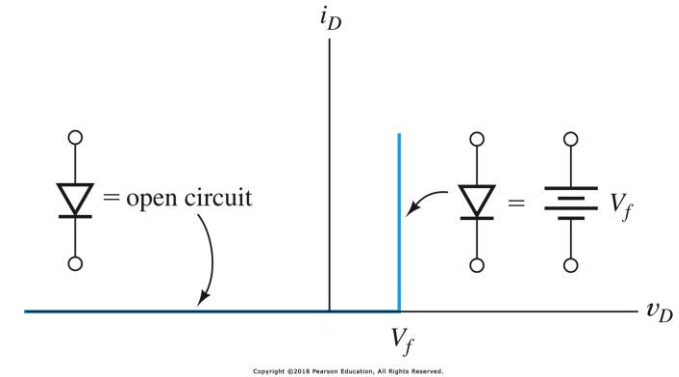
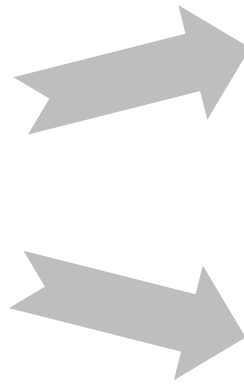
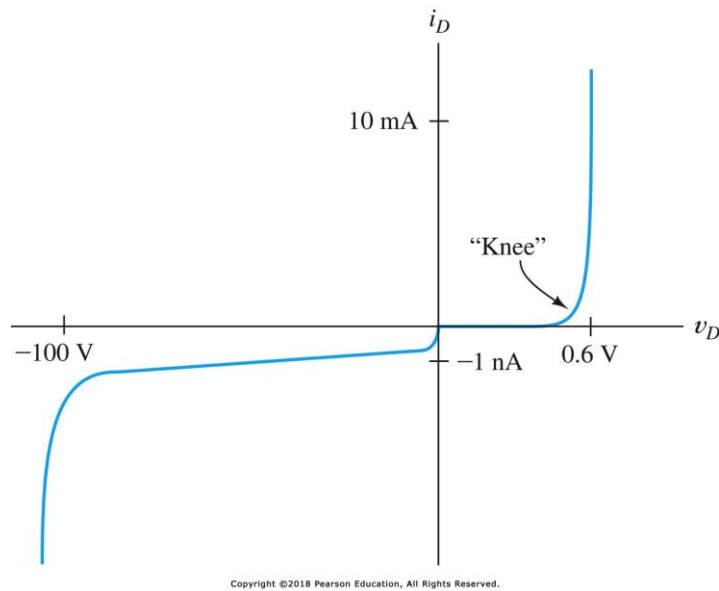
- Pour V_D positif tel que $V_D \gg V_T$, donnez l'expression du courant dans la diode.
- Donnez la valeur du courant de la diode à V_D négatif
- Pour une diode p^+n , quels porteurs contribuent au courant en direct ?
- Quelle simplification de l'équation de I_s est possible dans ce cas ?

Faites l'exemple résolu 3.6, Sedra *et al.*.

Modélisation de la diode - Contexte

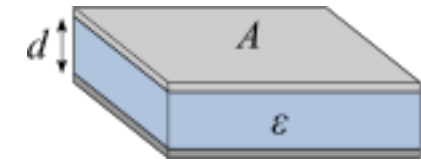
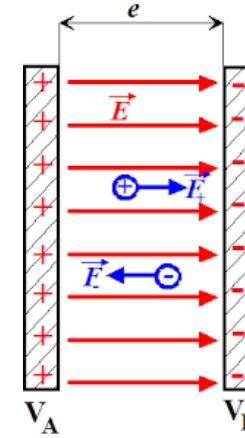
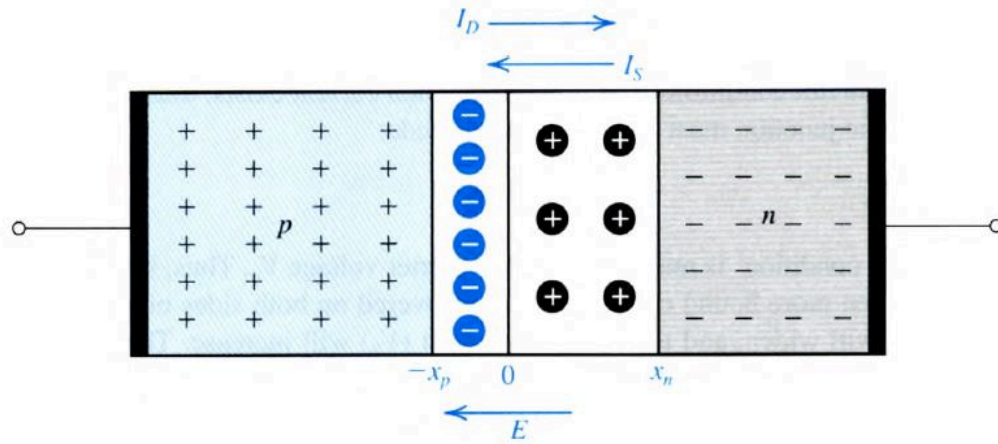
- Rappels : Les sections 4.1, 4.2 et 4.3, Sedra et al., sont des rappels de notions vues dans les sessions S1 et S2. Voir aussi les exercices 4.17, 4.19, 4.23, 4.28 (réponses disponibles à l'annexe L).
- La section 4.4, Sedra *et al.*, est de la matière nouvelle et traite de la réponse dynamique (i.e. petit signal) d'une diode.
- L'exercice suivant sur la capacité statique et dynamique de la diode complète ses propriétés petit signal.

Modélisation de la diode - Contexte



La capacité :

Manifestation de la charge et du champ électrique



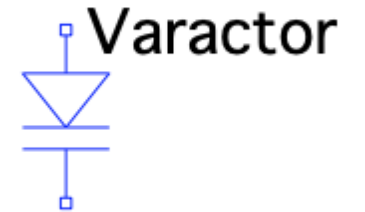
$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon_r A}$$

E.5 Capacité de jonction

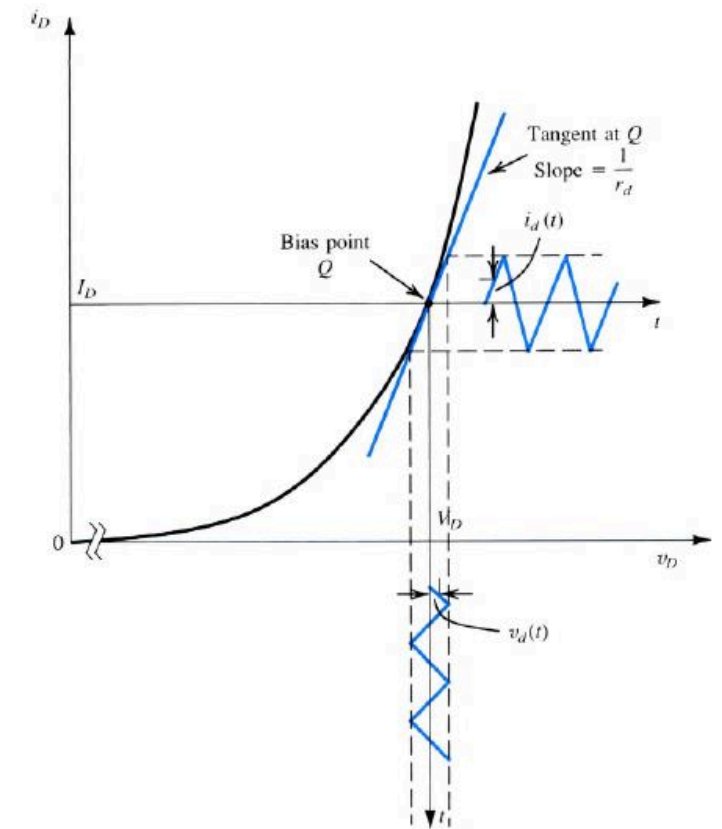
Soit une diode formée d'une jonction abrupte de dopage $N_d = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ et $N_a = 10^{18} \text{cm}^{-3}$ et dont la surface (section) est de 10^{-4}cm^2 .

- Quelle est la capacité statique (i.e. de jonction) de la diode sans polarisation ?
- Utilisée comme **varactor** dans un filtre opérant à 1 kHz, quelle serait la fréquence de coupure de ce filtre à une polarisation de 5 V (Considérez que rien d'autre ne change) ?
- Quelle est la capacité dynamique (i.e. de diffusion) de la diode opérée en direct à 0.2 mA et que le temps de vie des porteurs minoritaires est de 25 ns ?



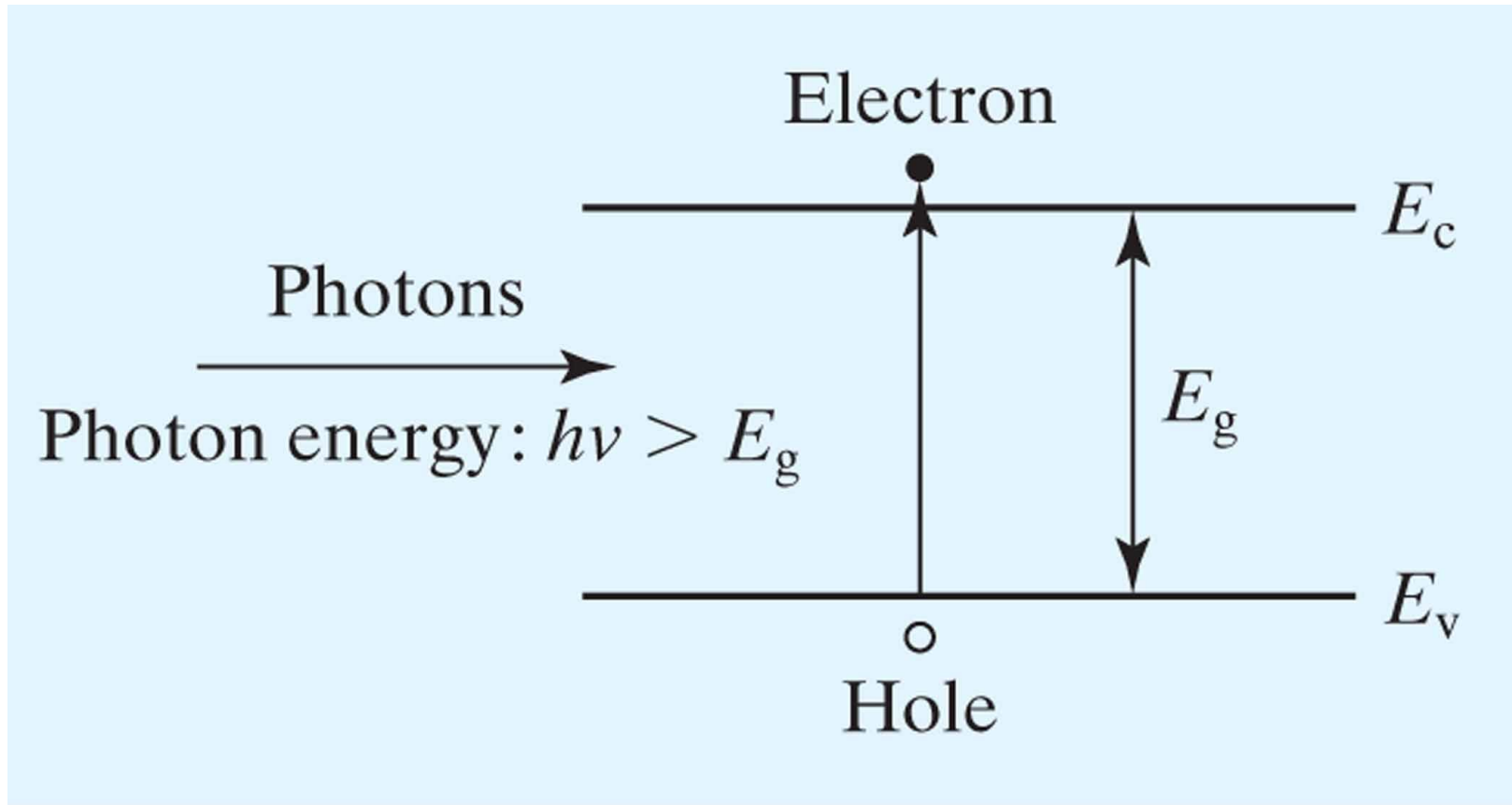
E.6 Modélisation de la diode

- Quelle est l'équation décrivant la résistance dynamique de la diode définie par $r_d = \left(\frac{\partial I}{\partial V} \right)^{-1}$.



- Donnez la valeur de la résistance dynamique de la diode pour les valeurs de courant suivantes : $I_D = 1 \mu\text{A}$, 1 mA et 50 mA .

Absorption d'un photon par un semiconducteur



E.7 La photodiode

On éclaire une photodiode avec une source de photon de 550 nm de longueur d'onde à un flux de 4.5×10^{15} photons par seconde.

- Quel est le courant maximal dans la photodiode si tous les photons étaient convertis en courant?
- Quelle est la puissance de cette excitation lumineuse ?

La photodiode a une **responsivité** de 0.35 mA/W.

- Quel est le courant généré dans la photodiode ?

Mécanique quantique et semiconducteurs

- Les photons sont des particules (de lumière) dont l'énergie est quantifiée
- L'énergie est fonction de la longueur d'onde (couleur)

$$E = \frac{hc}{\lambda} \approx \frac{1238.9 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{\lambda} \approx \frac{1.985 \times 10^{-16} \text{ J} \cdot \text{nm}}{\lambda}$$

- Il existe dans un semiconducteur une bande d'états quantique interdits aux porteurs
- Règle d'absorption: $E_{\lambda} \geq E_g$, i.e. l'énergie de la bande interdite
- Si absorbé: 1 photon \leftrightarrow 1 paire électron-trou

En pratique

- Efficacité quantique: quelle fraction des photons incidents est captée et transformée en courant.
- Responsivité: relation entre puissance captée et courant généré, pour une longueur d'onde donnée.

E.8 La diode électroluminescente - DEL

On pousse un courant de 20 mA à travers une DEL émettant à 624 nm dont l'efficacité quantique est de 40%.

- Quel est le flux de photons émis (i.e. photons par seconde) ?
- Quelle est la puissance lumineuse émise ?
- Quelle est l'efficacité de puissance ?
- Quelle est la puissance thermique qui est dissipé dans la DEL ?

Mécanique quantique et semiconducteurs

- Les photons sont des particules (de lumière) dont l'énergie est quantifiée
- L'énergie est fonction de la longueur d'onde (couleur)
- Il existe dans un semiconducteur une bande d'états quantique interdits aux porteurs
- Règle de recombinaison: les électrons et les trous se recombinent en redonnant leur énergie sous forme de phonons (chaleur) ou de photons (lumière)
 - Règles de recombinaison : trop compliquées pour aujourd'hui
- Si recombinaison radiative :
 - 1 paire électron-trou \leftrightarrow 1 photon
 - D'énergie correspondant à l'énergie de la bande interdite E_g
 - Donc dont la longueur d'onde (couleur) est lié au matériau

En pratique

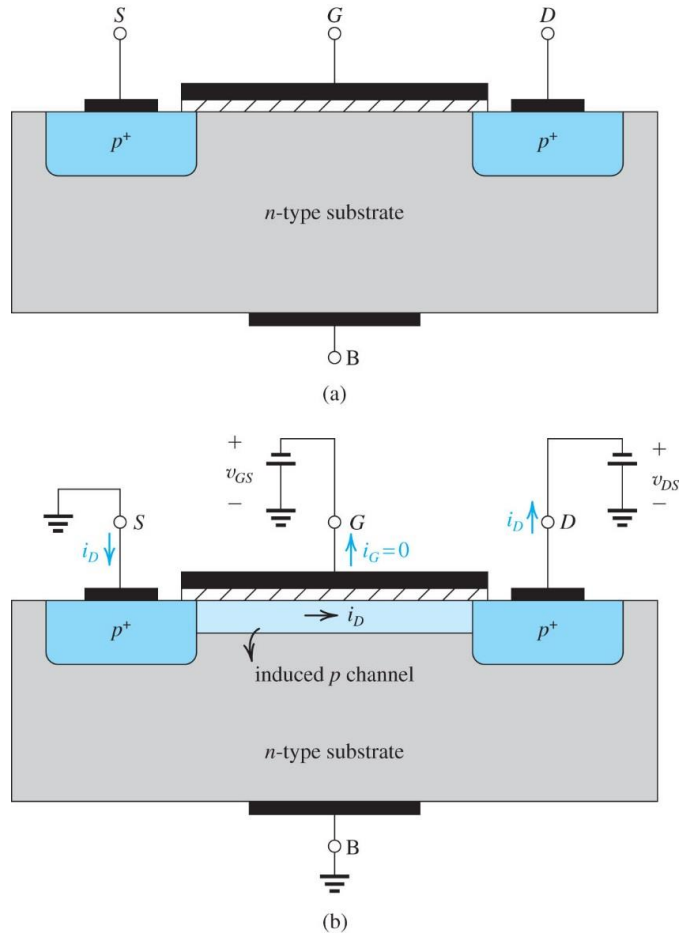
- Efficacité quantique: quelle fraction des paires électron-trou se recombinent en émettant un photons.

E.9 Structure des transistors BJT et MOSFET : similitudes et différences

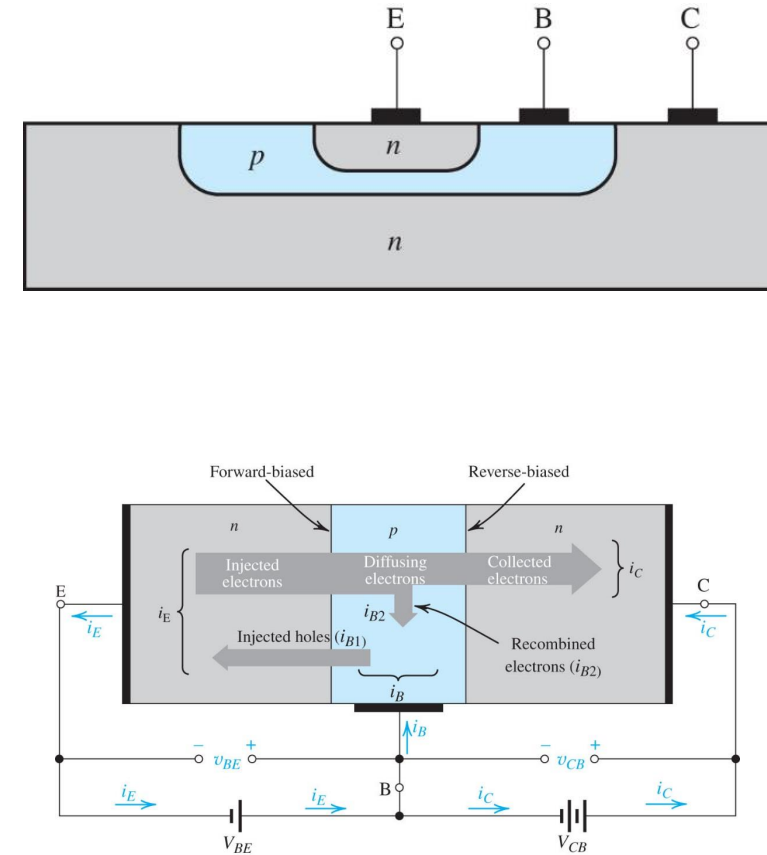
- Dessinez la structure du BJT npn et d'un nMOS :
 - BJT : identifiez l'émetteur, le collecteur et la base
 - MOSFET : identifiez la source, le drain, la grille, l'oxide de grille et le corps
- Identifiez les diodes présentes entre le collecteur et l'émetteur du BJT et entre la source et le drain du MOSFET :
Est-ce qu'un courant peut facilement passer ?
- Expliquez les mécanismes distincts (BJT versus MOSFET) qui permettent le fonctionnement de ces transistors.

E.9 Structure des transistors BJT et MOSFET : similitudes et différences

- MOSFET



- BJT



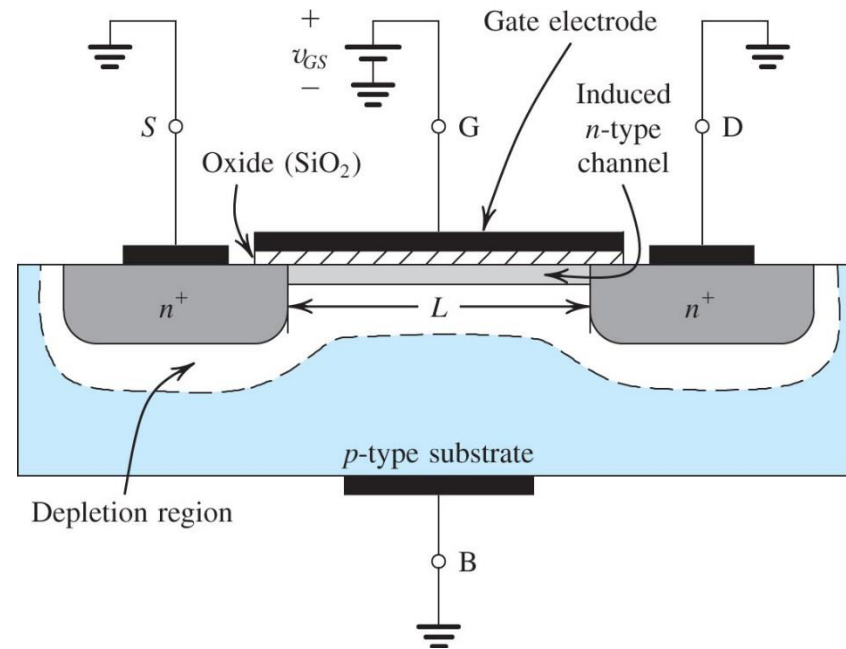


Figure 5.2 The enhancement-type NMOS transistor with a positive voltage applied to the gate. An *n* channel is induced at the top of the substrate beneath the gate.

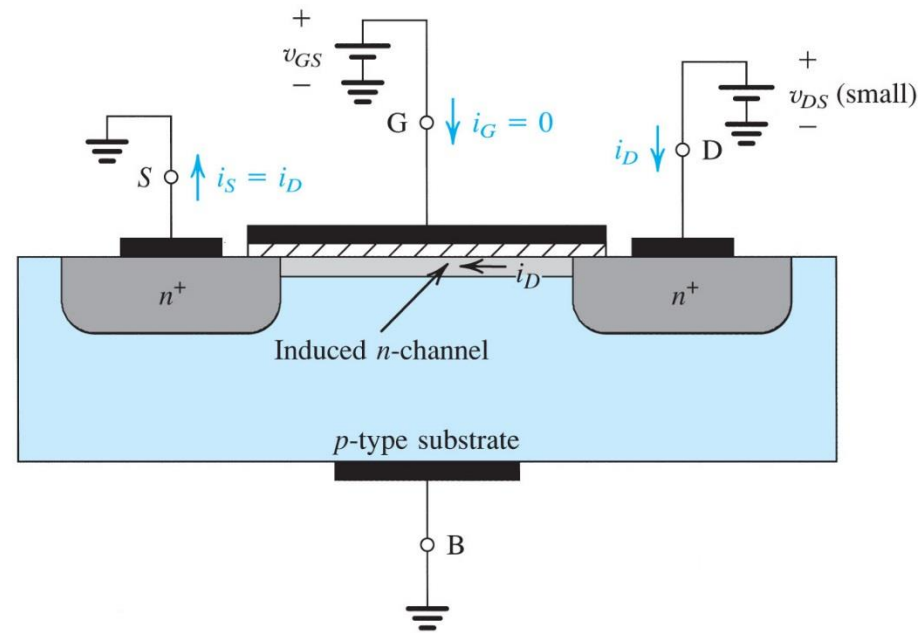


Figure 5.3 An NMOS transistor with $v_{GS} > V_t$ and with a small v_{DS} applied. The device acts as a resistance whose value is determined by v_{GS} . Specifically, the channel conductance is proportional to $v_{GS} - V_t$, and thus i_D is proportional to $(v_{GS} - V_t)v_{DS}$. Note that the depletion region is not shown (for simplicity).

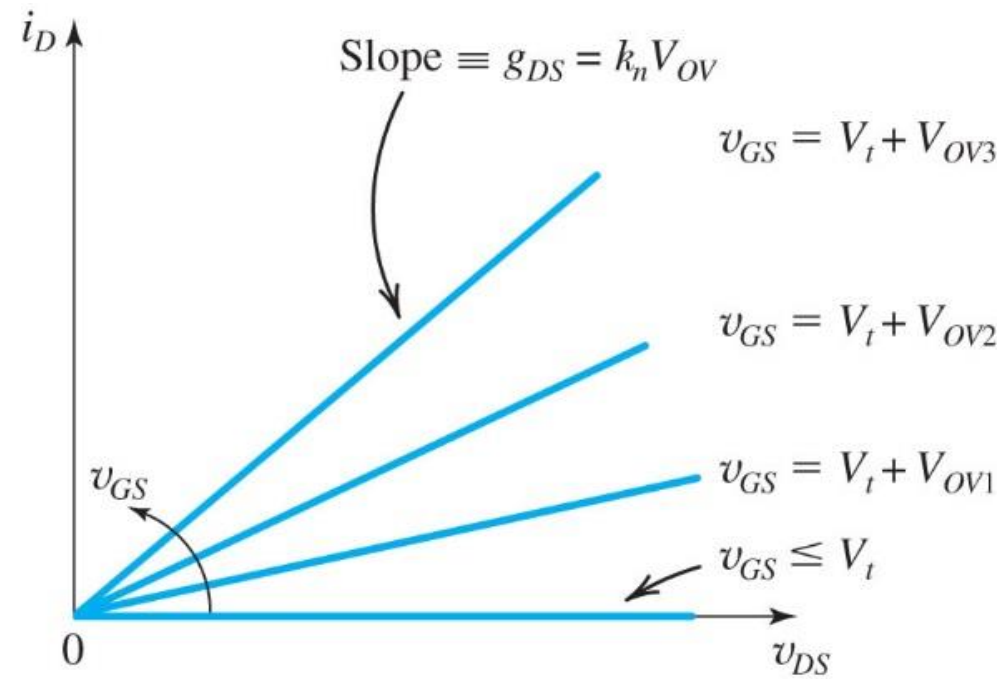


Figure 5.4 The i_D - v_{DS} characteristics of the MOSFET in Fig. 5.3 when the voltage applied between drain and source, v_{DS} , is kept small. The device operates as a linear resistance whose value is controlled by v_{GS} .

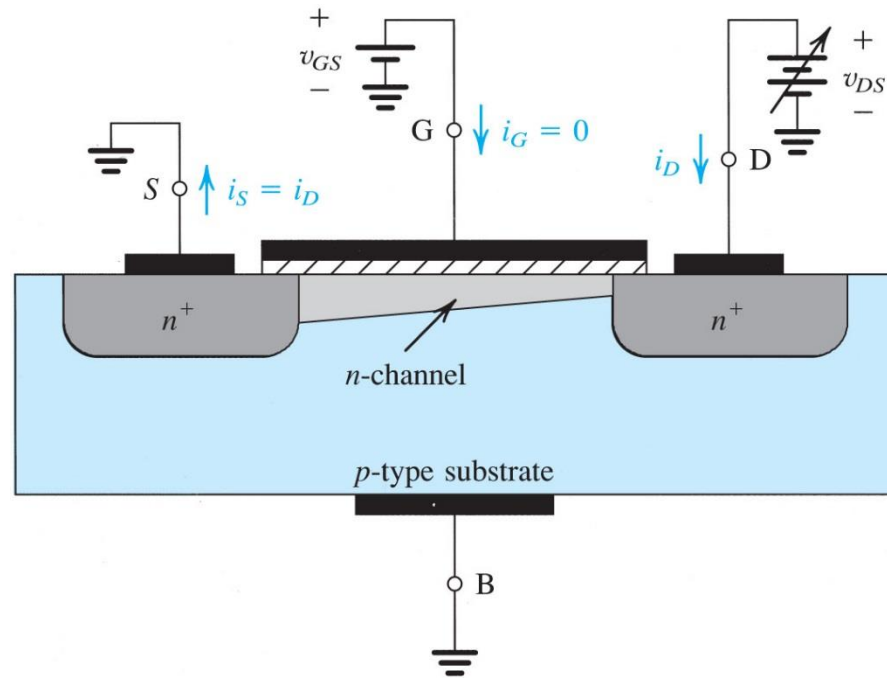


Figure 5.5 Operation of the enhancement NMOS transistor as v_{DS} is increased. The induced channel acquires a tapered shape, and its resistance increases as v_{DS} is increased. Here, v_{GS} is kept constant at a value $> V_t$; $v_{GS} = V_t + V_{OV}$.

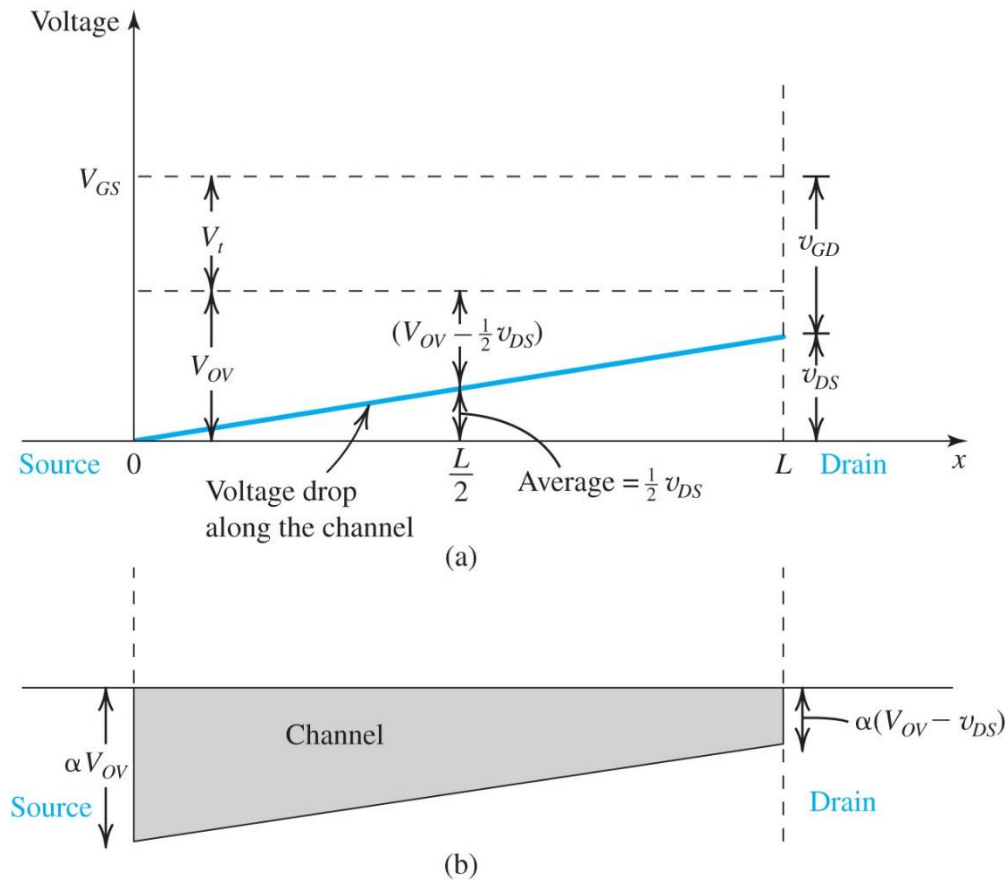


Figure 5.6 (a) For a MOSFET with $v_{GS} = V_t + V_{OV}$, application of v_{DS} causes the voltage drop along the channel to vary linearly, with an average value of $\frac{1}{2} v_{DS}$ at the midpoint. Since $v_{GD} > V_t$, the channel still exists at the drain end. (b) The channel shape corresponding to the situation in (a). While the depth of the channel at the source end is still proportional to V_{OV} , that at the drain end is proportional to $(V_{OV} - v_{DS})$.

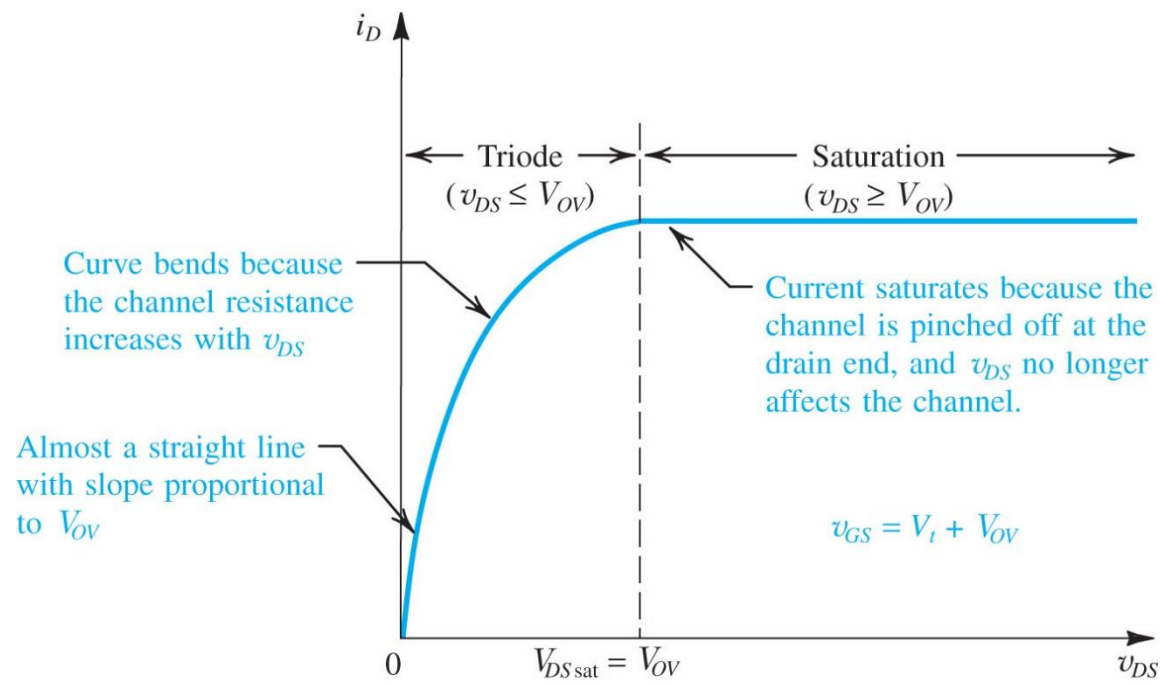
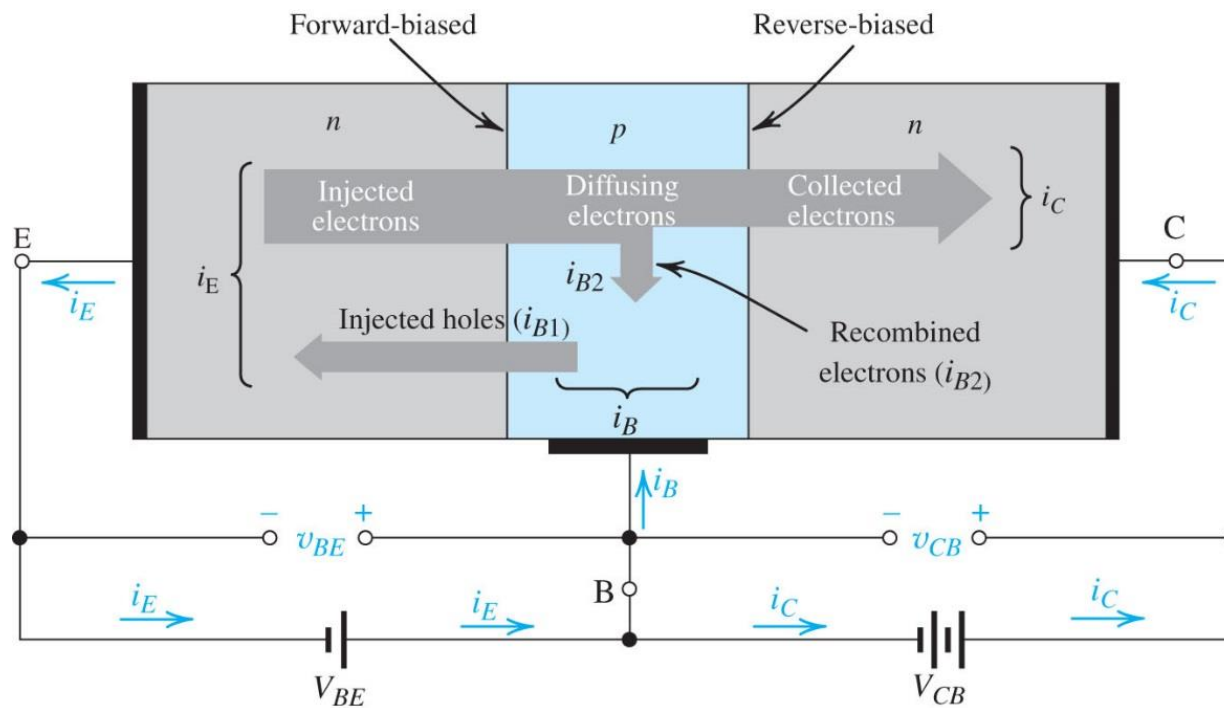


Figure 5.7 The drain current i_D versus the drain-to-source voltage v_{DS} for an enhancement-type NMOS transistor operated with $v_{GS} = V_t + V_{OV}$.

Fonctionnement du BJT



$$I = A(J_p + J_n)$$

$$I = Aq \left(\frac{D_p}{L_p} p_{n0} + \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \right) (e^{v/V_T} - 1)$$

$$\frac{I_p}{I_n} = \left(\frac{D_p}{D_n} \right) \left(\frac{L_n}{L_p} \right) \left(\frac{N_A}{N_D} \right)$$