Faculté Polytechnique de Mons

Service d'électronique et Microélectronique

1009-02 Electronique Physique

Exercices La Diode – Jonction PN

Prof. C. Valderrama

Exercices d'électronique physique

1009-02 Electronique Physique ... 1
Exercices d'électronique physique ... 2
La Diode ... 3
Objectifs ... 3
Rappels ... 3
Déroulement ... 3
Difficultés des étudiants ... 3
La jonction PN ... 3
Rappel ... 3
Exercices ... 9
Exercice 1 ... 9
Exercice 2 ... 13
Exercice 3 ... 17
Exercice 4 ... 21
Exercice 5 ... 25
Exercice 6 ... 29
Exercice 7 ... 33
Exercice 8 ... 36
Exercice 9 ... 40
Exercice 10 : examen juin 2003 ... 44
Exercice 11 ... 47

La Diode

Objectifs

- Illustrer les concepts physiques de la jonction PN
- Illustrer les différents modèles linéarisation autour d'un point de fonctionnement.

Rappels

Introduire la structure physique de la jonction PN, et de ses différents modèles.

Déroulement

- Rappel réalisé aux tableaux
- Exercice 6 réalisé par les étudiants : première utilisation des modèles
- Rappel : Schéma petits signaux
- Exercice 11 : réalisé par eux mêmes : circuit équivalent au laboratoire

Difficultés des étudiants

Difficultés liées à la théorie des circuits. Le concept de schéma petits signaux est compris en surface

La jonction PN

Rappel

Semi-conducteurs

- Semi-conducteur intrinsèque

$$pn = n_i^2$$
$$n_{i-Si300K} = 1.45 * 10^{10} cm^{-3}$$

- Condition de neutralité

$$n + N_a^- = p + N_d^+$$

- Charge de l'électron

$$q = 1,6x10^{-19} C$$

- Constante de Boltzmann :

$$k = 1,38x10^{-23} \frac{eV}{K}$$

§ Tension thermique (@300°K)

$$kT/q = 26mV$$

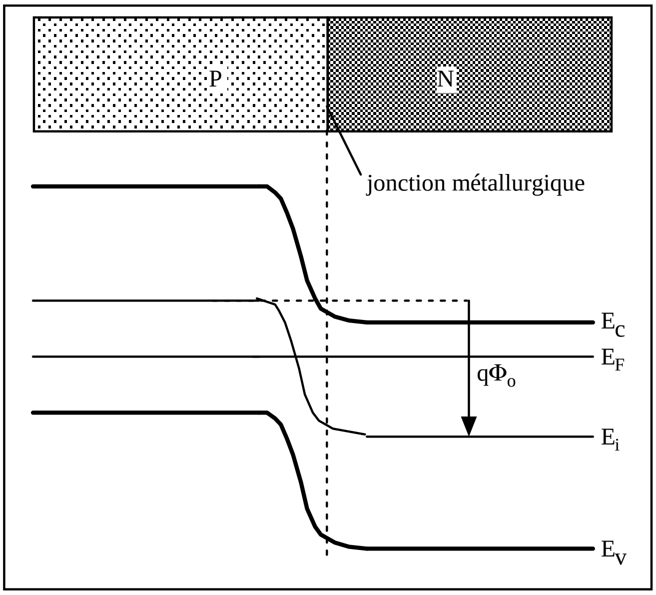
§ Conductivité

$$s\left[(\Omega m)^{-1}\right] = q\left(nm_n + pm_p\right)$$

Jonction PN

§ Potentiel de contact (potentiel interne de jonction PN à l’équilibre)

$$\Phi_0[V] = \frac{kT}{q} ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$



§ Champ électrique interne :

$$E_{max} = -\frac{q}{\varepsilon_s} N_a l_{po} = -\frac{q}{\varepsilon_s} N_d l_{no}$$

§ Expression de la neutralité électrique du système :

$$N_a l_{po} = N_d l_{no}$$

§ Largeurs des zones de déplétion en fonction du potentiel de contact (potentiel interne de jonction PN à l'équilibre)

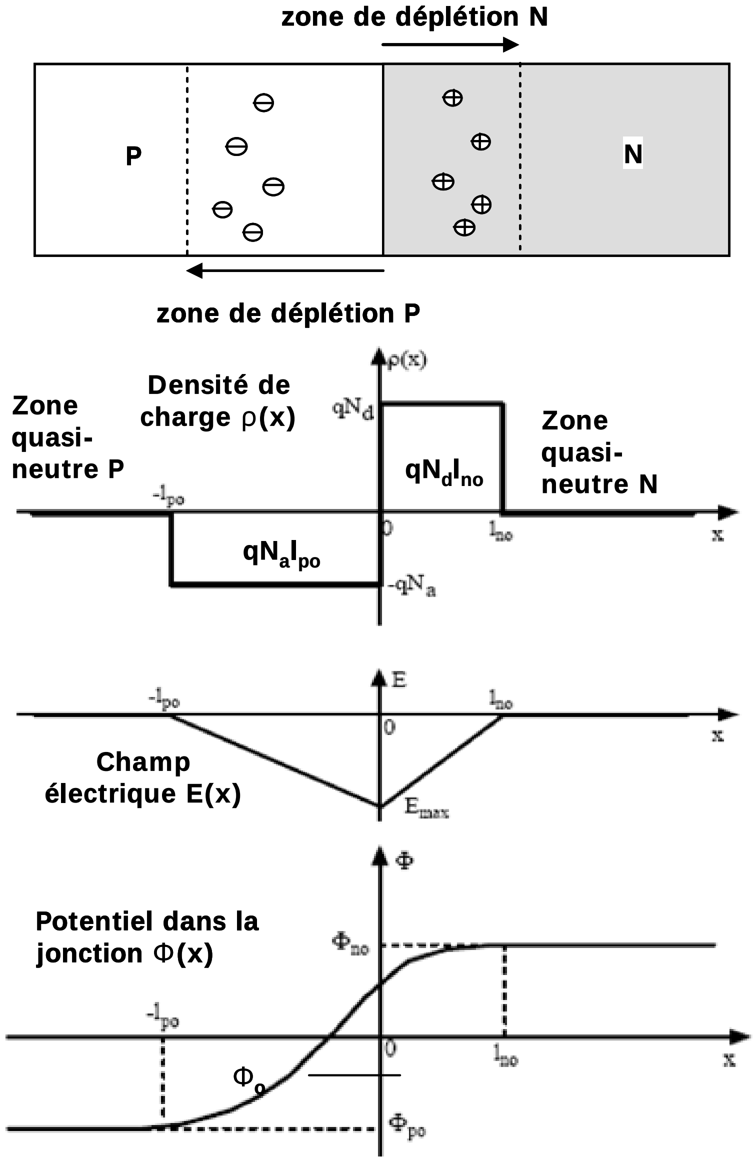
$$l_{po} = \sqrt{\frac{2e_s}{q}\frac{\Phi_o N_d}{N_a\left(N_a+N_d\right)}}$$

$$l_{no} = \sqrt{\frac{2e_s}{q}\frac{\Phi_o N_a}{N_d\left(N_a+N_d\right)}}$$

$$\Phi_o = \Phi_{no} - \Phi_{po} = \frac{qN_a}{2e_s}l_{po}^2 + \frac{qN_d}{2e_s}l_{no}^2$$

§ Zone de transition: largeur total de charge d'espace (potentiel interne de jonction PN à l'équilibre)

$$l_{no} + l_{po} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\Phi_o\left(\frac{1}{N_a}+\frac{1}{N_d}\right)}$$



§ Jonction PN polarisée

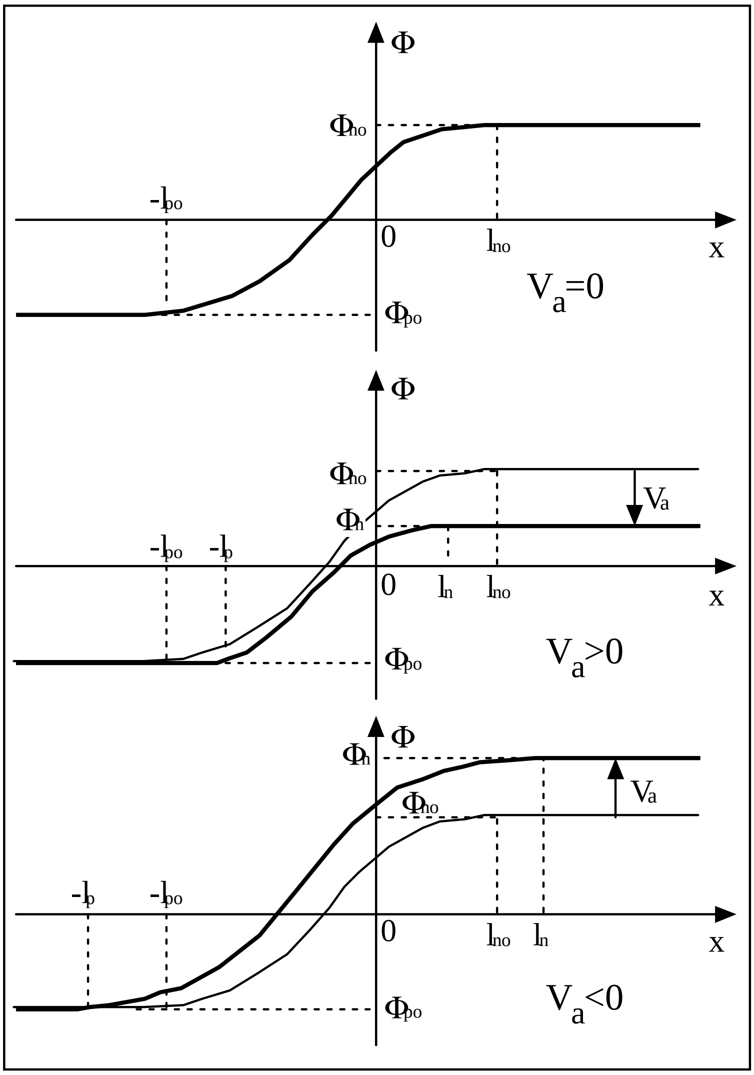
$$\Phi = \Phi_n - \Phi_p = \Phi_o - V_a$$

§ Largeurs des zones de déplétion en fonction du potentiel de contact

$$l_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\frac{(\Phi_o - V_a)}{(N_a + N_d)}\frac{N_d}{N_a}}$$

$$l_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\frac{(\Phi_o - V_a)}{(N_a + N_d)}\frac{N_a}{N_d}}$$

§ Potentiel dans la jonction PN



§ Largeur de la jonction

$$L[m] = \sqrt{\frac{2e_0 e_r (\Phi_0 - V_D)}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)}$$

§ Permittivité du vide

$$e_0 = 8{,}854x10^{-14}\ F/cm$$

§ Courant à travers la diode

$$I_D[A] = I_S\left[exp\left(\frac{qV_D}{nkT}\right) - 1\right]$$

I_S = courant de fuite, V_D = tension appliquée

§ Condition de neutralité

$$N_A W_P = N_D W_N$$

- Modèles de la diode

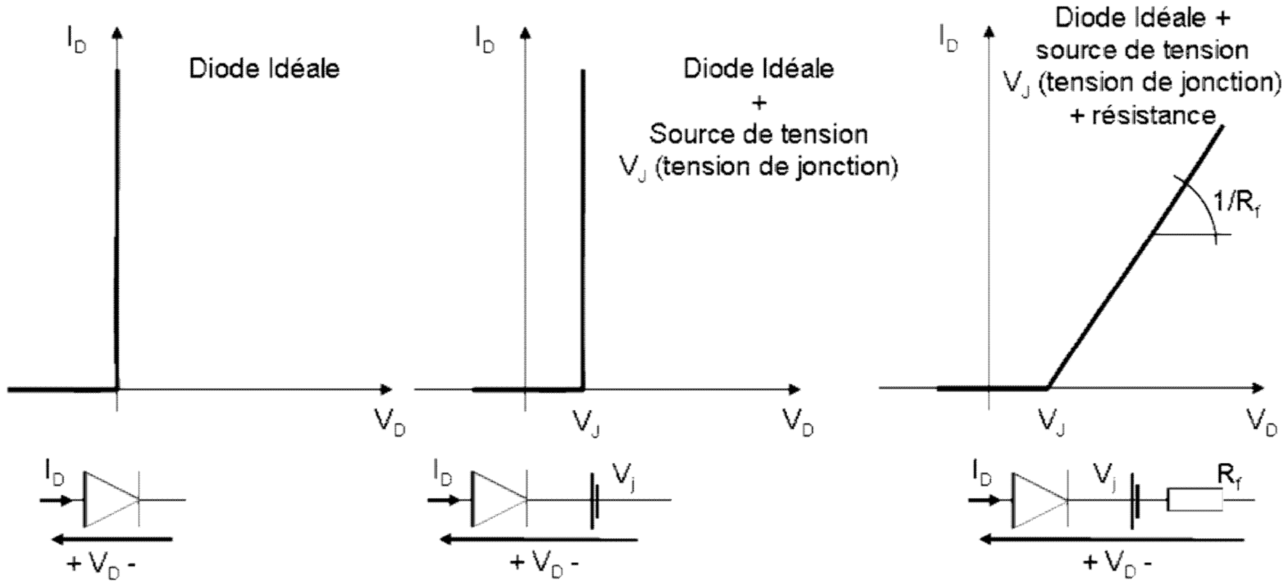


Figure 1 : Modèles de la diode

Exercices

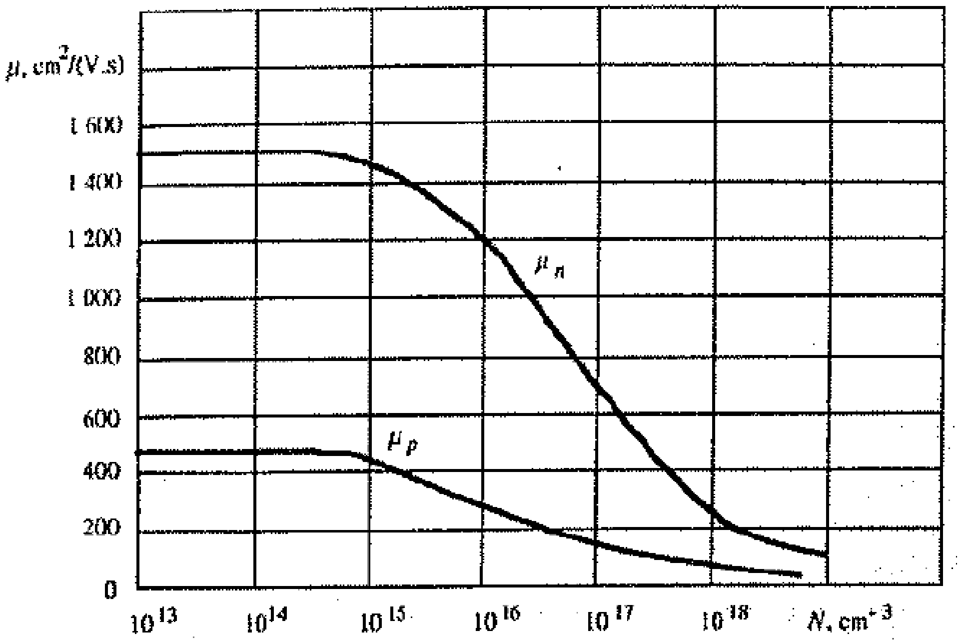


Figure 2 : dépendance des mobilités des électrons et des trous de la concentration des impuretés dans le silicium

---

Exercice 1

Un morceau de silicium pur a une longueur de 3 mm et une section transversale rectangulaire de 50 µm * 100 µm.

(a) Calculez la résistance R et la tension U entre les extrémités du morceau à T = 300 K si l'on mesure un courant de 1 µA (Si pur @300 K). Concentration intrinsèque n_i = $1{,}45 \times 10^{10}$ cm^{-3}, mobilité μ_n = 1500 cm^2/(V.s) et μ_p = 475 cm^2/(V.s)

Solution : R = 1,309 GΩ et U = 1309 V

(b) Idem pour un morceau de silicium de type N, si la concentration des donneurs à 300 K égale 5×10^{14} cm^{-3} (cf. Figure 2 : dépendance des mobilités des électrons et des trous de la concentration des impuretés dans le silicium)

Solution : R = 50 KΩ et U = 0,05 V

Solution (1.a)

Un morceau de silicium pur a une longueur de 3 mm et une section transversale rectangulaire de 50 µm * 100 µm.

Calculez la résistance R et la tension U entre les extrémités du morceau à T = 300 K si l'on mesure un courant de 1 µA (Si pur @300 K). Concentration intrinsèque n_i = 1,45x10^{10} cm^{-3}, mobilité μ_n = 1500 cm^2/(V.s) et μ_p = 475 cm^2/(V.s)

Solution : R = 1,309 GΩ et U = 1309 V

- Dimensions du morceau de silicium:

  L = 0,3 cm, W*h = (5*10^{-3}) * (1*10^{-2}) cm^2.

- Concentration intrinsèque:

  n_i = 1,45*10^{10} cm^{-3}

- Mobilité des électrons:

  μ_n = 1500 cm^2/(V.s)

- Mobilité des trous:

  μ_p = 475 cm^2/(V.s)

- Calcul de la conductivité:

$$\left.\begin{aligned} pn &= n_i^2 \\ q &= 1{,}6x10^{-19}\,C \\ p = n &= n_i \\ s\left[(\Omega m)^{-1}\right] &= q\left(nm_n + pm_p\right) \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} s\left[(\Omega m)^{-1}\right] &= qn_i\left(m_n + m_p\right) \\ &= 1{,}6x10^{-19} * 1{,}45x10^{10} * \left(1500 + 475\right) \\ &= 4{,}582x10^{-6}\left(\Omega cm\right)^{-1} \end{aligned}$$

- Calcul de la résistivité:

$$\begin{aligned} R[\Omega] &= \left(\frac{1}{s}\right)\left(\frac{L}{Wh}\right) = \frac{1}{4{,}582x10^{-6}}\,\frac{0{,}3}{5x10^{-3} * 1x10^{-2}} \\ &= 1{,}309 G\Omega \end{aligned}$$

- Calcul de la tension entre les extrémités du morceau :

$$\begin{aligned} U &= Ri = 1{,}309x10^{9} * 1x10^{-6} \\ &= 1309V \end{aligned}$$

Solution (1.b)

Un morceau de silicium pur a une longueur de 3 mm et une section transversale rectangulaire de 50 µm * 100 µm.

Calculez la résistance R et la tension U entre les extrémités du morceau à T = 300 K si l'on mesure un courant de 1 µA pour un morceau de silicium de type N, si la concentration des donneurs à 300 K égale $5x10^{14}$ cm^{-3} (cf. Figure 2). Concentration intrinsèque n_i = $1,45*10^{10}$ cm^{-3}, mobilité μ_n = 1500 $cm^2/(V.s)$ et μ_p = 475 $cm^2/(V.s)$

Solution : R = 50 KΩ et U = 0,05 V

- Concentration des donneurs :

  $N_d = 5x10^{14}$ cm^{-3}

- Concentration des trous:

$$\left.\begin{array}{l} n_i << n = N_D = 5x10^{14}\,cm^{-3} \\ pn = n_i^2 \end{array}\right\} \quad \begin{array}{l} p = \dfrac{n_i^2}{n} = \dfrac{n_i^2}{N_d} = \dfrac{\left(1,45x10^{10}\right)^2}{5x10^{14}} \\ \quad = 4,2x10^5\,cm^{-3} << n \end{array}$$

- Mobilité des électrons :

$$n = N_D = 5x10^{14} \Rightarrow m_n = 1500$$

- Mobilité des trous :

$$p = 4,2x10^5\,cm^{-3} \Rightarrow m_p = 475$$

- Calcul de la conductivité :

$$\begin{array}{l} q = 1,6x10^{-19}\,C \\ s\left[(\Omega m)^{-1}\right] = q\left(nm_n + pm_p\right) = \left(1,6x10^{-19}\right) * \left(5x10^{14} * 1500 + 4,2x10^5 * 475\right) \\ \quad = 0,12(\Omega cm)^{-1} \end{array}$$

- Calcul de la résistance:

$$\begin{array}{l} R[\Omega] = \left(\dfrac{1}{s}\right)\left(\dfrac{L}{Wh}\right) = \left(\dfrac{1}{0,12}\right)\left(\dfrac{0,3}{5x10^{-3} * 1x10^{-2}}\right) \\ \quad = 50k\Omega \end{array}$$

- Calcul de la tension:

$$U = R\,i = 5x10^{4} * 1x10^{-6}$$
$$= 50mV$$

Exercice 2

Sur un substrat de silicium de type N ayant une conductivité σ_n = 0,01 $(\Omega cm)^{-1}$ @300 K on veut former des ilots de type P avec une conductivité de 0,5 $(\Omega cm)^{-1}$ pour fabriquer des diodes.

(a) Quelle est la concentration d'atomes de bore qu'il faut introduire ? (cf. Figure 2, approximation successive)

Solution : $N_a = 1{,}1 x 10^{16}$ cm^{-3}

(b) Quelle sera la concentration d'électrons libres dans l'ilot?

Solution : $n = 2{,}1 x 10^{4}$cm^{-3}

(b) Quelle sera la concentration des trous dans l'ilot ?

Solution : $p=N_a = 1{,}1 x 10^{16}$ cm^{-3}

Solution (2.a)

Sur un substrat de silicium de type N ayant une conductivité σ_n = 0,01 $(\Omega cm)^{-1}$ @300 K on veut former des ilots de type P avec une conductivité de 0,5 $(\Omega cm)^{-1}$ pour fabriquer des diodes.

Quelle est la concentration d'atomes de bore qu'il faut introduire ? (cf. Figure 2 : dépendance des mobilités des électrons et des trous de la concentration des impuretés dans le silicium, approximation successive)

Solution : $N_a = 1{,}12x10^{16}\ cm^{-3}$

- Conductivité du semi-conducteur type N :

$$s_p\left[(\Omega m)^{-1}\right] = 0{,}01(\Omega m)^{-1}$$

- En supposant une concentration d'impuretés supérieure a ni mais inferieur à $5x10^{14}cm^{-3}$ ont trouve une mobilité des électrons:

$$n_i << N_d < 5x10^{14}cm^{-3} \to m_n = 1500\frac{cm^2}{V.s}$$

- Ce qui nous donne une concentration de donneurs:

$$\left.\begin{array}{l} s_n\left[(\Omega m)^{-1}\right] = 0{,}01(\Omega m)^{-1} \\ m_n = 1500\dfrac{cm^2}{V.s} \\ s\left[(\Omega m)^{-1}\right] = q(nm_n + pm_p) \\ n = N_d >> p \end{array}\right\} \quad s_n = qnm_n$$

$$s_n = qnm_n \Rightarrow N_d = \frac{s}{qm_n} = \frac{0{,}01}{1{,}6x10^{-19} * 1500}\frac{V}{\Omega\frac{C}{s}cm^3} = 4{,}17x10^{13}\,cm^{-3}$$

- Encore inferieur à $5*10^{14}cm^{-3}$, ce qui nous permet de dire que la mobilité des électrons reste valable.
- Pour obtenir un ilot de type P, il faudra introduire des impuretés de type accepteur (atomes de Bore) avec une concentration $N_a >> N_d$
- En supposant une concentration d'impuretés supérieure a N_d mais inferieur à $5x10^{14}cm^{-3}$ ont trouve une mobilité pour les trous de:

$$N_a << N_a < 5x10^{14}cm^{-3} \to m_p = 475\frac{cm^2}{V.s}$$

- Qui nous donnera une concentration d'impuretés Na :

$$\left.\begin{aligned}
&s_{p}\left[(\Omega m)^{-1}\right] = 0{,}5(\Omega m)^{-1}\\
&m_{n} = 1500\,\frac{cm^{2}}{V.s}\\
&m_{p} = 475\,\frac{cm^{2}}{V.s}\\
&s\left[(\Omega m)^{-1}\right] = q\left(nm_{n} + pm_{p}\right)\\
&p \approx N_{a} >> n
\end{aligned}\right\}\quad s_{p} = qpm_{p}$$

$$s_{p} = qN_{a}m_{p} \Rightarrow N_{a} = \frac{s_{p}}{qm_{p}} = \frac{0{,}5}{1{,}6x10^{-19} * 475}\,\frac{V}{\Omega\frac{C}{s}cm^{3}} = 6{,}6x10^{15}\,cm^{-3}$$

- Cependant on constate que nous ne respectons pas l'hypothèse $N_d << 5x10^{14}cm^{-3}$, donc il va falloir recalculer la mobilité :

$$N_{a} = 6{,}6x10^{15}\,cm^{-3} \rightarrow m_{p} = 310\,\frac{cm^{2}}{V.s}$$

- Et on recalcule la concentration :

$$s_{p} = qN_{a}m_{p} \Rightarrow N_{a} = \frac{s_{p}}{qm_{p}} = \frac{0{,}5}{1{,}6x10^{-19} * 310}\,\frac{V}{\Omega\frac{C}{s}cm^{3}} = 1x10^{16}\,cm^{-3}$$

- Pour laquelle on obtient encore la mobilité :

$$\left.\begin{aligned}
&N_{a} = 1x10^{16}\,cm^{-3}\\
&N_{d} = 4{,}17x10^{13}\,cm^{-3}
\end{aligned}\right\}\quad N = N_{a} + N_{d} = 1x10^{16} + 4{,}17x10^{13} = 1x10^{16}\,cm^{-3}$$

$$N = 1x10^{16}\,cm^{-3} \rightarrow \begin{cases} m_{p} = 280\,\dfrac{cm^{2}}{V.s}\\[2ex] m_{n} = 1200\,\dfrac{cm^{2}}{V.s}\end{cases}$$

- Et on vérifie la conductivité :

$$\left.\begin{aligned}
&N_{a} = 1x10^{16}\,cm^{-3}\\
&Nd = 4{,}2x10^{13}\,cm^{-3}\\
&s\left[(\Omega m)^{-1}\right] = q\left(nm_{n} + pm_{p}\right)
\end{aligned}\right\}\quad \begin{aligned}&s\left[(\Omega m)^{-1}\right] = 1{,}6x10^{-19} * \left(4{,}2x10^{13} * 1200 + 1x10^{16} * 280\right)\\ &= 0{,}46(\Omega m)^{-1}\end{aligned}$$

Solution (2.b)

Quelle sera la concentration d'électrons libres dans les ilots ?

Solution : n = $2{,}1x10^4$ cm^{-3}

- Par la condition de neutralité :

$$n + N_a^- = p + N_d^+$$

- Si on suppose que p>> n (semi-conducteur Type P) :

$$p \approx N_a^- - N_d^+ = 1x10^{16} - 4{,}17x10^{13} \approx 1x10^{16}\,cm^{-3}$$

- Par le produit p.n on obtient la concentration d'électrons libres :

$$p\,n = n_i^2 \Rightarrow n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{\left(1{,}45x10^{10}\right)^2}{1x10^{16}} = 21025cm^{-3}$$

Solution (2.c)

Quelle sera la concentration des trous dans l'ilot ?

Solution : p=N_a = $1{,}1x10^{16}$ cm^{-3}

- Par la condition de neutralité :

$$n + N_a^- = p + N_d^+$$

- Avec la concentration d'électrons libres n et les concentrations d'impuretés N_a et N_d on recalcule p :

$$n + N_a^- = p + N_d^+$$
$$p = n + N_a^- - N_d^+ = 2x10^4 + 1{,}12x10^{16} - 4{,}2x10^{13} = 1{,}1x10^{16}\,cm^{-3}$$

- Et on obtient p=N_a

Exercice 3

Calculez la largeur L de la jonction PN d'une diode et l'intensité E du champ électrique dans la jonction pour :

a. $V_A = 0$ V
b. $V_A = -5$ V
c. $V_A = +0,3$ V

Si T = 300 K, $N_A = 6,9 \times 10^{17}$ cm^{-3}, $N_D = 8,33 \times 10^{13}$ cm^{-3} et $\varepsilon_r = 12$

Solution

(a) L = 3,297 µm et E = 2069 V/cm
(b) L = 9,516 µm et E = 5970 V/cm
(c) L = 2,467 µm et E = 1548 V/cm

Solution (3.a)

Calculez la largeur L de la jonction PN d'une diode et l'intensité E du champ électrique dans la jonction pour V_A = 0 V. Si T = 300 K, $N_A = 6,9x10^{17}$ cm^{-3}, $N_D = 8,33x10^{13}$ cm^{-3} et ε_r = 12.

L = 3,297 µm et E = 2069 V/cm

- Le potentiel interne (jonction à l'équilibre) :

$$\Phi_0[V] = \frac{kT}{q} ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) = \frac{1{,}38x10^{-23} * 300}{1{,}6x10^{-19}} ln\left(\frac{6{,}9x10^{17} * 8{,}33x10^{13}}{\left(1{,}45x10^{10}\right)^2}\right)$$
$$= 0{,}68V$$

- Avec V_A = 0V la jonction est à l'équilibre. Largeur de la jonction PN à l'équilibre :

$$l_{no} + l_{po} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\Phi_o\left(\frac{1}{N_a}+\frac{1}{N_d}\right)} = \sqrt{\frac{2*\left(8{,}854x10^{-14}*12\right)}{1{,}6x10-19}(0{,}68)\left(\frac{1}{6{,}9x10^{17}}+\frac{1}{8{,}33x10^{13}}\right)}$$
$$= 3{,}29x10^{-4}\,cm = 3{,}29x10^{-6}\,m = 3{,}29mm$$

- Noter que N_a>>N_d, on peut simplifier:

$$l_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\frac{(\Phi_o - V_a)}{(N_a+N_d)}\frac{N_d}{N_a}} \rightarrow \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}(\Phi_o - V_a)\frac{N_d}{(N_a)^2}} \approx 3{,}98x10^{-4}\,mm$$
$$l_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\frac{(\Phi_o - V_a)}{(N_a+N_d)}\frac{N_a}{N_d}} \rightarrow \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}(\Phi_o - V_a)\frac{1}{N_d}} \approx 3{,}29mm$$
$$l = l_p + l_n \approx l_n \approx 3{,}29mm$$

La largeur de la jonction ***l*** coïncide avec la zone de déplétion N $\boldsymbol{l_n}$ La zone de déplétion N $\boldsymbol{l_n}$ >> $\boldsymbol{l_p}$.

§ Champ électrique interne :

$$E_{max} = -\frac{q}{\varepsilon_s}N_a l_{po} = -\frac{q}{\varepsilon_s}N_d l_{no}$$
$$E_{max} = -\frac{q}{\varepsilon_s}N_d l_{no} \approx -\frac{1{,}6x10^{-19}}{\left(8{,}85x10^{-14}*12\right)}8{,}3x10^{13}*3{,}29x10^{-4}$$
$$\approx -4{,}13*10^3 Vcm^{-1}$$
$$E = \frac{\Phi_0}{l} = \frac{0{,}68}{3{,}29x10^{-4}} = 2{,}1x10^3 Vcm^{-1}$$

Solution (3.b)

Calculez la largeur L de la jonction PN d'une diode et l'intensité E du champ électrique dans la jonction pour V_A = -5 V. Si T = 300 K, $N_A = 6,9*10^{17}$ cm^{-3}, $N_D = 8,33*10^{13}$ cm^{-3} et ε_r = 12.

L = 9,516 µm et E = 5970 V/cm

- Largeur de la jonction PN avec V_A = -5 V :

$$l = l_n + l_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}(\Phi_o - V_a)\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)}$$

$$= \sqrt{\frac{2*(8{,}854x10^{-14}*12)}{1{,}6x10-19}(0{,}68+5)\left(\frac{1}{6{,}9x10^{17}} + \frac{1}{8{,}33x10^{13}}\right)}$$

$$= 9{,}52x10^{-4}\, cm = 9{,}52x10^{-6}\, m = 9{,}52mm$$

- Noter que $N_a >> N_d$, on peut simplifier:

$$l_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\frac{(\Phi_o - V_a)}{(N_a + N_d)}\frac{N_d}{N_a}} \rightarrow \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}(\Phi_o - V_a)\frac{N_d}{(N_a)^2}} \approx 1{,}15x10^{-2}\, mm$$

$$l_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\frac{(\Phi_o - V_a)}{(N_a + N_d)}\frac{N_a}{N_d}} \rightarrow \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}(\Phi_o - V_a)\frac{1}{N_d}} \approx 9{,}52mm$$

$$l = l_p + l_n \approx l_n \approx 9{,}52mm$$

La largeur de la jonction ***l*** coïncide avec la zone de déplétion N $\boldsymbol{l_n}$. La zone de déplétion N $\boldsymbol{l_n} >> \boldsymbol{l_p}$. Avec une tension externe $\boldsymbol{V_a}$ négative la largeur de la jonction l augmente $\boldsymbol{l > l_0}$

§ Champ électrique interne :

$$E_{max} = -\frac{q}{\varepsilon_s}N_a l_p = -\frac{q}{\varepsilon_s}N_d l_n$$

$$E_{max} = -\frac{q}{\varepsilon_s}N_d l_n \approx -\frac{1{,}6x10^{-19}}{(8{,}85x10^{-14}*12)}8{,}3x10^{13}*9{,}52x10^{-4}$$

$$\approx -1{,}2x10^4\, Vcm^{-1}$$

$$E = \frac{\Phi_0 - V_a}{l} = \frac{(0{,}68+5)}{9{,}52x10^{-4}} = 5{,}97x10^3\, Vcm^{-1}$$

Le champ électrique interne maximal $\boldsymbol{E_{max}}$ augmente ainsi que le champ électrique résultant ***E***.

Solution (3.c)

Calculez la largeur L de la jonction PN d'une diode et l'intensité E du champ électrique dans la jonction pour V_A = +0,3 V. Si T = 300 K, $N_A = 6{,}9*10^{17}$ cm^{-3}, $N_D = 8{,}33*10^{13}$ cm^{-3} et ε_r = 12.

L = 2,467 µm et E = 1548 V/cm

- Largeur de la jonction PN avec V_A = +0,3 V (polarisation positive):

$$l = l_n + l_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}(\Phi_o - V_a)\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)}$$
$$= \sqrt{\frac{2*(8{,}854x10^{-14}*12)}{1{,}6x10-19}(0{,}68+0{,}3)\left(\frac{1}{6{,}9x10^{17}} + \frac{1}{8{,}33x10^{13}}\right)}$$
$$= 2{,}5x10^{-4}\,cm = 2{,}5mm$$

La largeur se réduit avec la tension externe positive $\boldsymbol{V_a}$.

- Noter que N_a>>N_d, on peut simplifier:

$$l_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\frac{(\Phi_o - V_a)}{(N_a + N_d)}\frac{N_d}{N_a}} \rightarrow \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}(\Phi_o - V_a)\frac{N_d}{(N_a)^2}} \approx 2{,}97x10^{-4}\,mm$$
$$l_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\frac{(\Phi_o - V_a)}{(N_a + N_d)}\frac{N_a}{N_d}} \rightarrow \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}(\Phi_o - V_a)\frac{1}{N_d}} \approx 2{,}5mm$$
$$l = l_p + l_n \approx l_n \approx 2{,}5mm$$

La largeur de la jonction ***l*** coïncide avec la zone de déplétion N $\boldsymbol{l_n}$. La zone de déplétion N $\boldsymbol{l_n}$ >> $\boldsymbol{l_p}$. Avec une tension externe $\boldsymbol{V_a}$ positive la largeur de la jonction ***l*** diminue $\boldsymbol{l>l_0}$

§ Champ électrique interne :

$$E_{max} = -\frac{q}{\varepsilon_s}N_a l_p = -\frac{q}{\varepsilon_s}N_d l_n$$
$$E_{max} = -\frac{q}{\varepsilon_s}N_d l_n \approx -\frac{1{,}6x10^{-19}}{(8{,}85x10^{-14}*12)}8{,}3x10^{13}*2{,}5x10^{-4}$$
$$\approx -3{,}1x10^{3}Vcm^{-1}$$
$$E = \frac{\Phi_0 - V_a}{l} = \frac{(0{,}68-0{,}3)}{2{,}5x10^{-4}} = 1{,}54x10^{3}Vcm^{-1}$$

Le champ électrique interne maximal $\boldsymbol{E_{max}}$ diminue en valeur absolu ainsi que le champ électrique résultant ***E***.

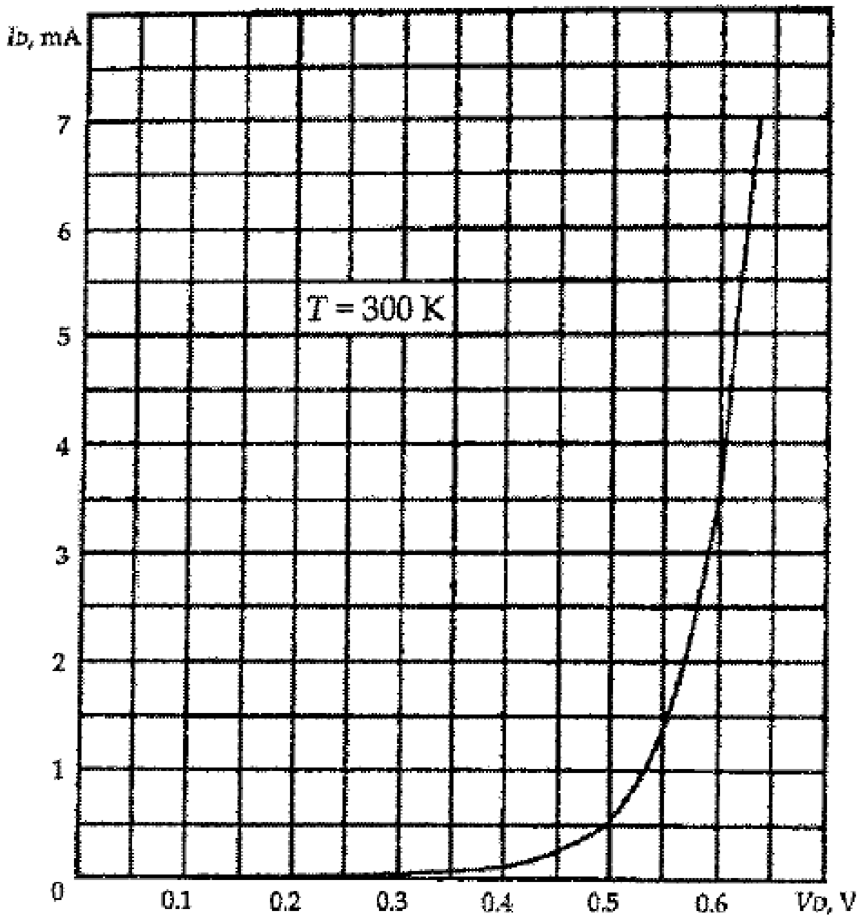


Figure 3 : Caractéristique directe d'une diode au silicium

Exercice 4

Soit la caractéristique de la diode au silicium représentée à la **Figure 3** :

a. Trouvez la résistance statique R_D et dynamique r_d de la diode pour I_{D1} = 3 mA et I_{D2} = 1 mA.
b. Idem mais analytiquement.

Avec T = 300 K, n = 1,97 et $I_S = 2{,}86 \times 10^{-8}$ A

Solution :

a. Pour I_{D1} = 3 mA, R_D = 196 Ω et r_d = 50 Ω. Pour I_{D2} = 1 mA, R_D = 535 Ω et r_d = 18,33 Ω
b. Pour I_{D1} = 3 mA, R_D = 194 Ω et r_d = 17 Ω. Pour I_{D2} = 1 mA, R_D = 535 Ω et r_d = 51 Ω

Solution (4a)

Soit la caractéristique de la diode au silicium représentée à la **Figure 3** :

Trouvez la résistance statique R_D et dynamique r_d de la diode pour I_{D1} = 3 mA et I_{D2} = 1 mA.

Solution :

Pour I_{D1} = 3 mA, R_D = 196 Ω et r_d = 50 Ω. Pour I_{D2} = 1 mA, R_D = 535 Ω et r_d = 18,33 Ω

- La résistance statique dépend du point de fonctionnement de la diode :

  $$R_D = V_D / I_D$$

  Avec un courant de diode $\boldsymbol{I_D}$ = 3 mA on obtient une tension $\boldsymbol{V_D}$ = 590 mV :

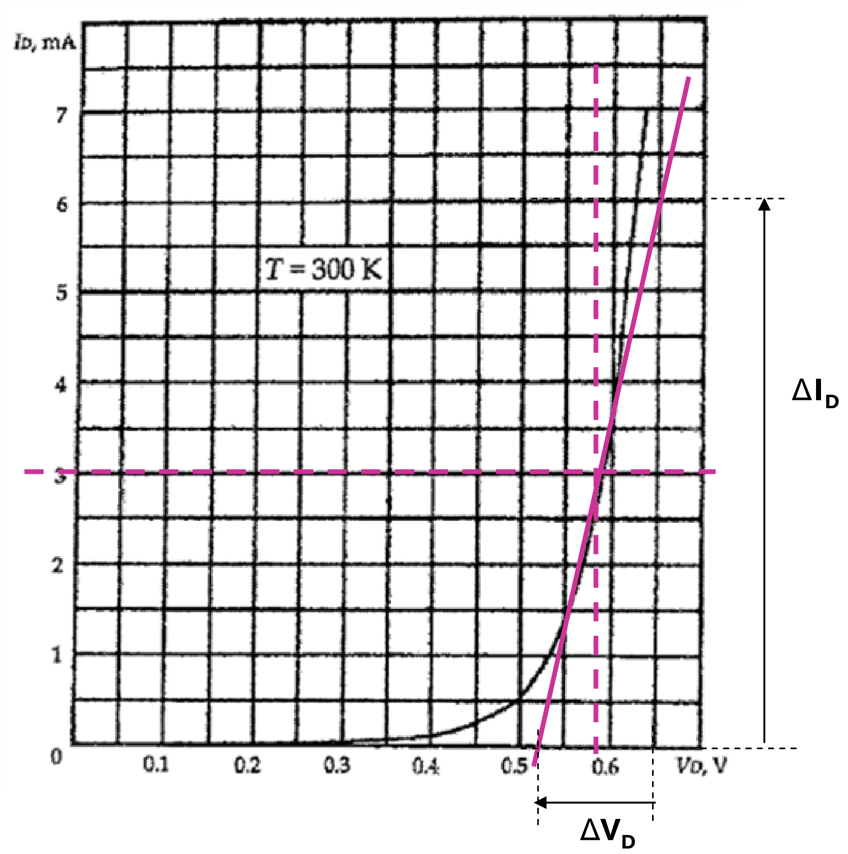
  $$R_D = V_D / I_D = 0{,}59 / 3x10^{-3} = 197\Omega$$

  Avec un courant de diode $\boldsymbol{I_D}$ = 1 mA on obtient une tension $\boldsymbol{V_D}$ = 535 mV :

  $$R_D = V_D / I_D = 0{,}535 / 1x10^{-3} = 535\Omega$$

- La résistance dynamique (résistance pour le modèle « petits signaux ») correspond à la pente de la caractéristique de la diode autour du point de fonctionnement (V_D, I_D) = pente de la tangente au point de fonctionnement :

  $$r_D = \Delta V_D / \Delta I_D$$



- Avec un courant de diode $\boldsymbol{I_D}$ = 3 mA et la tension $\boldsymbol{V_D}$ = 590 mV :

$$r_D = \Delta V_D / \Delta I_D = (650 - 540)/(6 - 0) = 18{,}3\Omega$$

- Avec un courant de diode $\boldsymbol{I_D}$ = 1 mA et la tension $\boldsymbol{V_D}$ = 535 mV :

$$r_D = \Delta V_D / \Delta I_D = (650 - 490)/(3{,}2 - 0) = 50\Omega$$

Solution (4b)

Avec la caractéristique de la diode au silicium représentée à la **Figure 3** :

Trouvez la résistance statique R_D et dynamique r_d de la diode pour I_{D1} = 3 mA et I_{D2} = 1 mA. Mais analytiquement. Avec T = 300 K, n = 1,97 et $I_S = 2{,}86 \text{x} 10^{-8}$ A

Solution :

Pour I_{D1} = 3 mA, R_D = 194 Ω et r_d = 17 Ω. Pour I_{D2} = 1 mA, R_D = 535 Ω et r_d = 51 Ω

- Courant à travers la diode :

$$I_D[A] = I_S\left[exp\left(\frac{qV_D}{nkT}\right) - 1\right] \rightarrow V_D = \frac{nkT}{q} ln\left(\frac{I_D}{I_S} + 1\right)$$

- Courant de fuite $I_S = 2{,}86*10^{-8}$ A

  n = 1,97

- Tension de diode avec I_{D1} = 3 mA :

$$V_D = \frac{nkT}{q} ln\left(\frac{I_D}{I_S}+1\right) = \frac{1{,}97*1{,}38x10^{-23}*300}{1{,}6x10^{-19}} ln\left(\frac{3x10^{-3}}{2{,}86x10-8}+1\right) = \mathit{0{,}59V}$$

- Résistance statique avec un courant de diode $\boldsymbol{I_D}$ = 3 mA:

$$R_D = V_D / I_D = 0{,}59/3x10^{-3} = \mathit{197}\Omega$$

- Tension de diode avec I_{D2} = 1 mA :

$$V_D = \frac{nkT}{q} ln\left(\frac{I_D}{I_S}+1\right) = \frac{1{,}97*1{,}38x10^{-23}*300}{1{,}6x10^{-19}} ln\left(\frac{1x10^{-3}}{2{,}86x10^{-8}}+1\right) = 0{,}\mathit{533V}$$

- Résistance statique avec un courant de diode $\boldsymbol{I_D}$ = 1 mA:

$$R_D = V_D / I_D = 0{,}533/1x10^{-3} = \mathit{533}\Omega$$

- La résistance dynamique (résistance pour le modèle « petits signaux ») à partir de l'équation du courant autour du point de fonctionnement (V_D, I_D):

$$r_D = dV_D / dI_D = \frac{d}{dI_D}\left[\frac{nkT}{q} ln\left(\frac{I_D}{I_S}+1\right)\right] = \frac{nkT}{q}\frac{1}{\frac{I_D}{I_S}+1}\frac{1}{I_S} = \frac{nkT}{q}\frac{1}{I_D+I_S}$$

- La résistance dynamique (résistance pour le modèle « petits signaux ») avec un courant de diode $\boldsymbol{I_D}$ = 3 mA:

$$r_D = \frac{nkT}{q}\frac{1}{I_D+I_S} = \frac{1{,}97*1{,}38x10^{-23}*300}{1{,}6x10^{-19}}\frac{1}{3x10^{-3}+2{,}86x10^{-8}} = \mathit{17}\Omega$$

- La résistance dynamique (résistance pour le modèle « petits signaux ») avec un courant de diode $\boldsymbol{I_D}$ = 1 mA:

$$r_D = \frac{nkT}{q}\frac{1}{I_D+I_S} = \frac{1{,}97*1{,}38x10^{-23}*300}{1{,}6x10^{-19}}\frac{1}{1x10^{-3}+2{,}86x10^{-8}} = 51\Omega$$

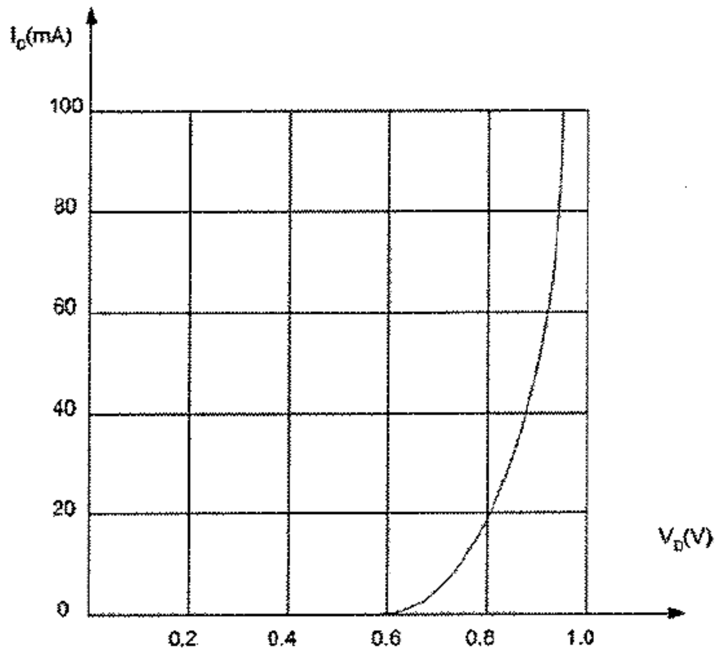


Figure 4 : Caractéristique directe d'une diode au silicium 1N4153 à 25°C

Exercice 5

Une diode au silicium 1N4153 dont la caractéristique à 25°C se trouve à la **Figure 4**. La diode est utilisée dans le schéma de la **Figure 5** avec V_A = 6V et R = 100 Ω

a. Déterminez le courant de la diode et sa tension,
b. Si on diminue V_A de 3V, quelle est la nouvelle valeur de R si le courant dans la diode reste à la valeur précédente ?

Solution :

a. I_D = 51 mA, V_D = 0,9 V
b. R = 40 Ω

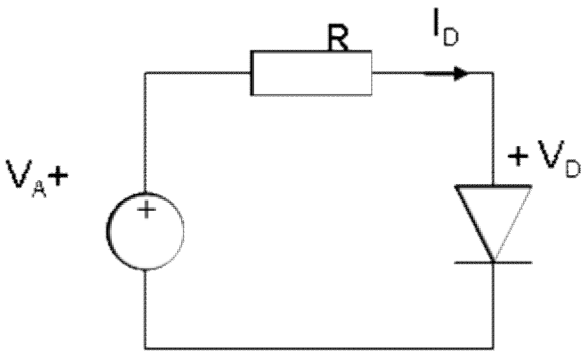


Figure 5 : schéma exercice 5

Solution (5.a)

Une diode au silicium 1N4153 dont la caractéristique à 25°C se trouve à la **Figure 4**. La diode est utilisée dans le schéma de la **Figure 5** avec V_A = 6V et R = 100 Ω

Déterminez le courant de la diode et sa tension

Solution :

I_D = 52 mA, V_D = 0,9 V

- L'équation des tensions :

$$V_A = R.I_D + V_D \Rightarrow I_D = \frac{V_A - V_D}{R}$$

- Pour une tension de diode :

$$V_D = 0V \rightarrow I_D = \frac{V_A}{R} = \frac{6}{100} = 0{,}06A$$

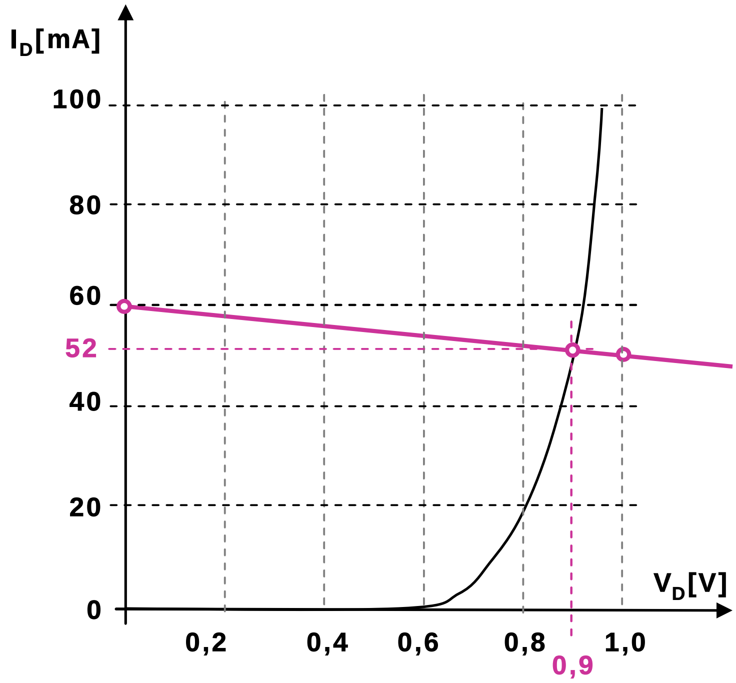
- Pour un courant :

$$I_D = 0A \rightarrow V_D = V_A = 6V$$

- On trace la droite de charge (mais dans les limites du graphique) : pour une tension de diode :

$$V_D = 1V \rightarrow I_D = \frac{V_A}{R} - \frac{V_D}{R} = 0{,}06 - \frac{1}{100} = \mathit{0{,}05A}$$

- Ce qui nous permet de tracer la droite de charge qui passe par I_D = 50mA et V_D = 1V :



- Donnant comment point d'intersection V_D = 0,9V et I_D = 52mA

Solution (5.b)

Une diode au silicium 1N4153 dont la caractéristique à 25°C se trouve à la **Figure 4**. La diode est utilisée dans le schéma de la **Figure 5** avec V_A = 6V et R = 100 Ω

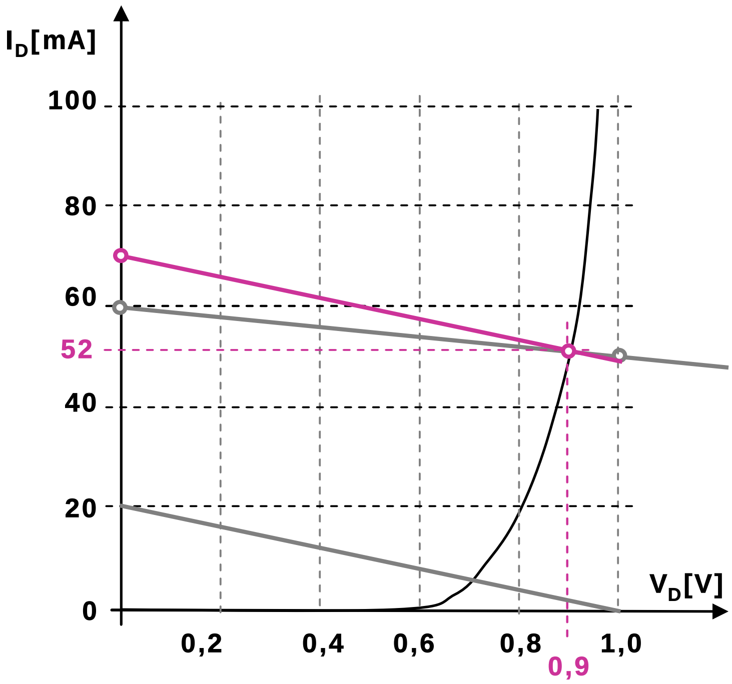
Si on diminue V_A de 3V, quelle est la nouvelle valeur de R si le courant dans la diode reste à la valeur précédente ?

Solution :

R = 40 Ω

- La pente pour la nouvelle droite, avec V_A=3V, mais qui passe par le même point de fonctionnement statique I_D= 52mA pour V_D=0,9V :

$$\frac{I_{D0} - I_{D(V_D=V_A)}}{V_D - V_{D(I_D=0A)}} = \frac{0{,}052 - 0}{0{,}9 - 3} = -0{,}02\frac{A}{V}$$



- Et pour la nouvelle résistance :

$$\left.\begin{array}{l} V_D = 0{,}9V \\ I_D = 52mA \\ I_D = \dfrac{V_A}{R} - \dfrac{V_D}{R} \end{array}\right\} \quad R = \frac{V_A - V_D}{I_D} = \frac{3 - 0{,}9}{0{,}052} = 40\Omega$$

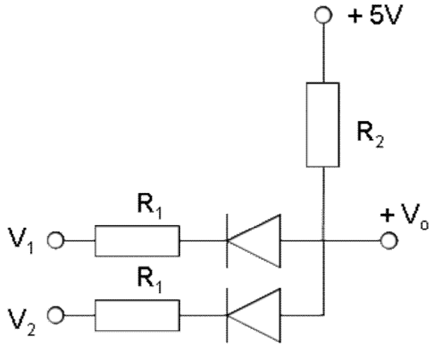


Figure 6 : schéma exercice 6

Exercice 6

Déterminez la tension de sortie V_0 du schéma

Figure 6 pour les valeurs suivantes de tension :

a. $V_1 = V_2 = 5$ V
b. $V_1 = 5$ V, $V_2 = 0$ V
c. $V_1 = 0$ V, $V_2 = 0$ V

La diode au silicium utilisée possède les caractéristiques suivantes :

$R_f = 30\ \Omega$

$V_j = 0,6$ V

$I_s = 0$

$R_r \rightarrow \infty$

$R_1 = 270\ \Omega$

$R_2 = 4,7\ k\Omega$

Solution :

a. Vo = 5 V
b. Vo = 0,86 V
c. Vo = 0,77 V

Solution (6.a)

Déterminez la tension de sortie V_0 du schéma

Figure 6 pour les valeurs de tension suivantes:

$V_1 = V_2 = 5$ V.

La diode au silicium utilisée possède les caractéristiques suivantes :

$R_f = 30\ \Omega$

$V_j = 0{,}6$ V

$I_s = 0$

$R_r \rightarrow \infty$

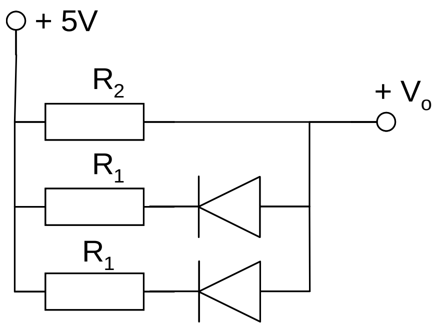
$R_1 = 270\ \Omega$

$R_2 = 4{,}7\ k\Omega$

Solution :

Vo = 5 V

- Avec $V_1 = V_2 = 5V$:



- Pas de circulation de courant par les résistances et diodes bloquées. Donc, $V_O = 5V$

Solution (6.b)

Déterminez la tension de sortie V_0 du schéma

Figure 6 pour les valeurs de tension suivantes:

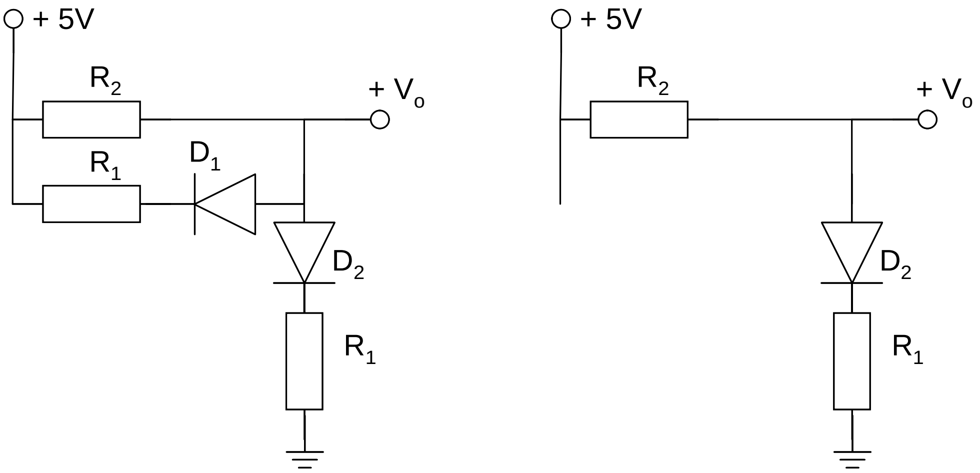
$V_1 = 5$ V, $V_2 = 0$ V

La diode au silicium utilisée possède les caractéristiques suivantes :

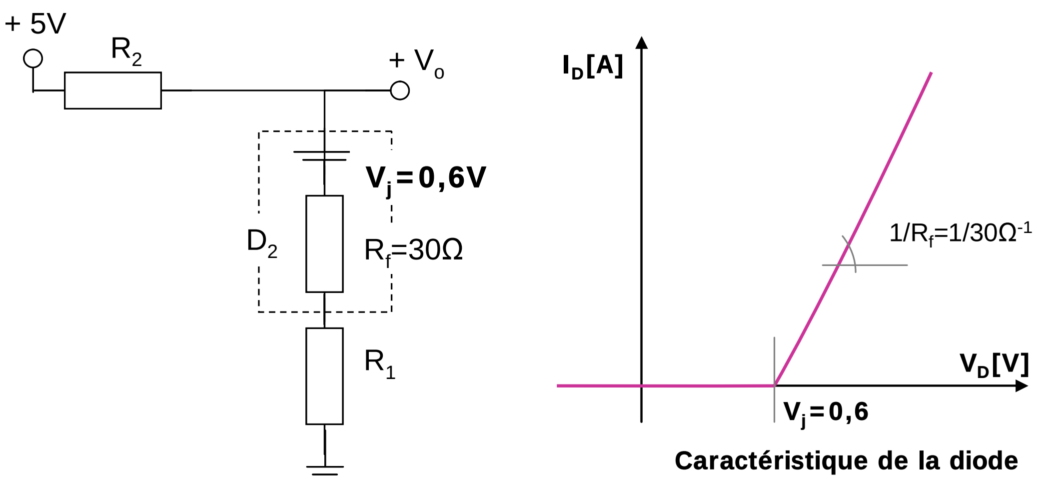
$R_f = 30\ \Omega$, $V_j = 0{,}6$ V, $I_s = 0$, $R_r \rightarrow \infty$, $R_1 = 270\ \Omega$, $R_2 = 4{,}7\ k\Omega$

Solution :

Vo = 0,864 V



- Pas de circulation de courant dans la diode D_1 (bloquée) et la résistance R_{1D1}.
- On remplace la diode par son schéma équivalente (par la résistance R_f et la tension de jonction V_j):



- L'expression du courant I_D que circule par la diode D_2:

$$I_{D2} = \frac{5V - V_j}{R_2 + R_f + R_1} = \frac{5V - 0{,}6}{4{,}7k + 30 + 270} = 0{,}88mA$$

- Et pour la tension de sortie V_o:

$$Vo = 5V - I_{D2}R_2 = 5V - 0{,}88x10^{-3} * 4{,}7x10^3 = 0{,}864\,V$$

- On constate que avec V_o = 0,864V et V_{CC}=5V, la diode D_1 est effectivement bloquée :

$$V_{D1} = V_o - 5V = 0{,}864 - 5 = -4{,}12\,V$$

- Autrement, un courant inverse I_{D1} devrait circuler par la diode D_1 (mais le courant inverse I_S = 0A):

$$V_1 - R_1 I_{D1} - V_{D1} - R_f I_{D1} = 5V \rightarrow I_{D1} = \frac{(V_1 - V_{D1} - 5V)}{R_1 + R_f} = \frac{(5 - 0{,}6 - 5)}{4k7 + 30} = -12{,}7mA$$

Solution (6.c)

Déterminez la tension de sortie V_0 du schéma

Figure 6 pour les valeurs de tension suivantes:

V_1 = 0 V, V_2 = 0 V.

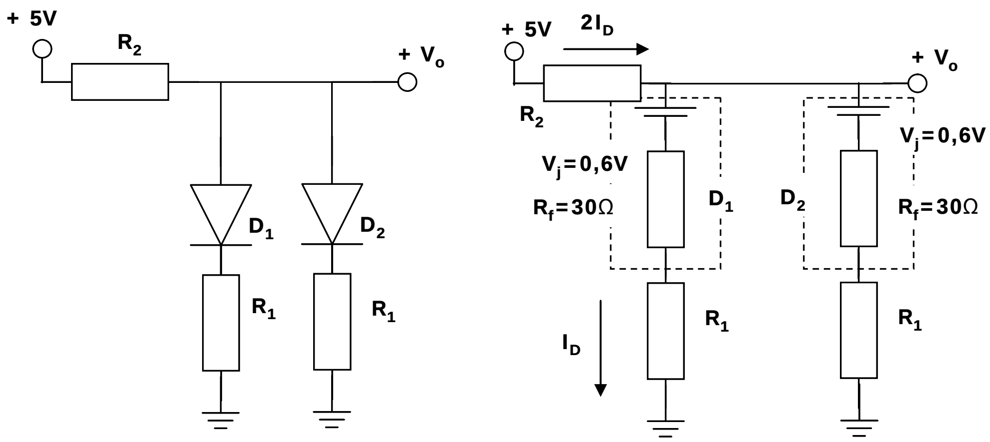
La diode au silicium utilisée possède les caractéristiques suivantes :

R_f = 30 Ω, V_j = 0,6 V, I_s = 0, $R_r \rightarrow \infty$, R_1 = 270 Ω, R_2 = 4,7 kΩ

Solution :

Vo = 0,77V

- Avec V_1=V_2=0V, le schéma électrique devient :



- On calcule le courant par diode, avec les mêmes composants dans les deux branches :

$$V_{CC} = 2I_D R_2 + V_j + I_D R_f + I_D R_1 \rightarrow I_D = \frac{V_{CC} - V_j}{2R_2 + R_f + R_1} = \frac{5 - 0{,}6}{2 * 4k7 + 30 + 270} = 0{,}45mA$$

- Et pour la tension de sortie V_o :

$$V_{CC} = 2I_D R_2 + V_o \rightarrow V_o = V_{CC} - 2I_D R_2 = 5 - 2 * 0{,}45x10^{-3} * 4k7 = 0{,}77V$$

Exercice 7

Les caractéristiques du circuit **Figure 7** sont R_1 = 1 kΩ, R_2 = 2 kΩ, R_3 = 400 Ω, R_4 = 100 Ω, E = 10 V. Le modèle de la diode passante est caractérisé par une tension continue 0,6 V et R_f = 0 Ω.

a. Quelle(s) diode(s) condui(sent)t ?
b. Quelle est la valeur du courant qui la (les) traverse ?

Solution :

(a) D_1

(b) I = 5,4 mA

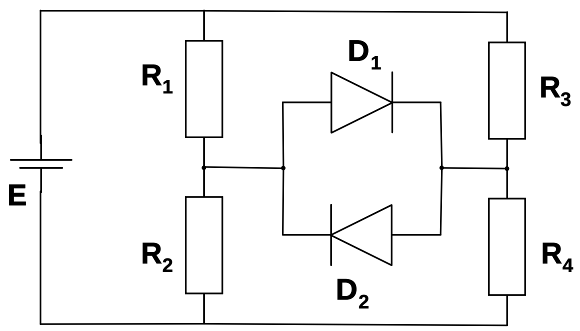


Figure 7 : schéma exercice 7

Solution (7.a)

Les caractéristiques du circuit **Figure 7** sont R_1 = 1 kΩ, R_2 = 2 kΩ, R_3 = 400 Ω, R_4 = 100 Ω, E = 10 V. Le modèle de la diode passante est caractérisé par une tension continue 0,6 V et R_f = 0 Ω.

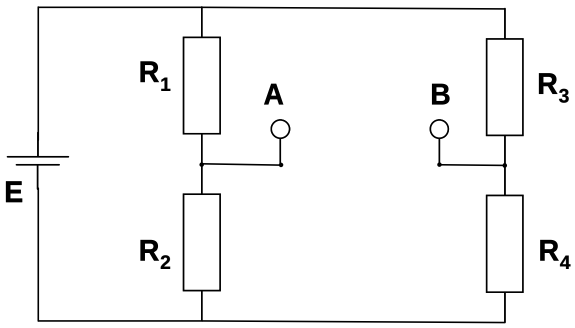
Quelle(s) diode(s) condui(sent)t ?

Solution :

D_1 en conduction et D_2 bloquée

$$I_{D1} = 5{,}35mA$$
$$V_{D1} = 675mV$$
$$I_{D2} = 0A$$
$$V_{D2} = -675mV$$

- Analyse sans les diodes :



- Tensions sur A et B sans les diodes:

$$V_A = \frac{E}{R_1 + R_2} R_2 = \frac{10}{1000 + 2000} 2000 = 6{,}67V$$
$$V_B = \frac{E}{R_{13} + R_4} R_4 = \frac{10}{400 + 100} 100 = 2V$$
$$V_A > V_B$$

- Puisque $V_A > V_B$, la diode D_1 conduit et la diode D_2 est bloquée.

Solution (7.b)

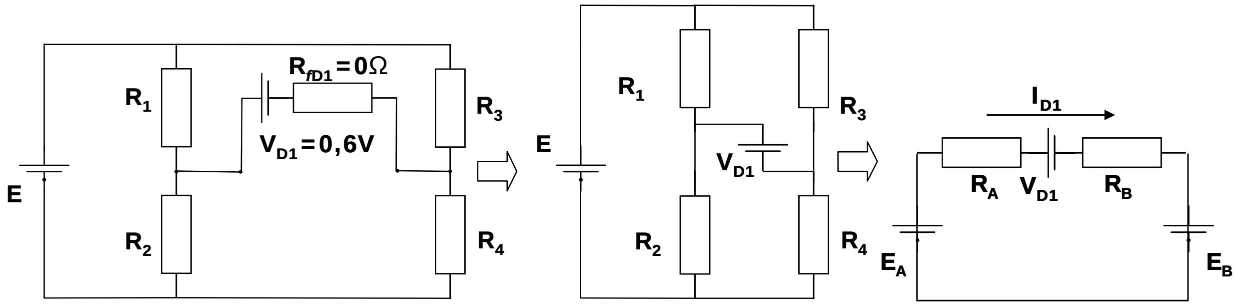
Les caractéristiques du circuit **Figure 7** sont R_1 = 1 kΩ, R_2 = 2 kΩ, R_3 = 400 Ω, R_4 = 100 Ω, E = 10 V. Le modèle de la diode passante est caractérisé par une tension continue 0,6 V et R_f = 0 Ω.

Quelle est la valeur du courant qui la (les) traverse ?

Solution :

I = 5,4 mA

- On remplace D_1 par son modèle équivalent en conduction:



- On recalcule les tensions et ensuite le courant sur la diode D_1:

$$E_A = E\,\frac{R_2}{R_1+R_2} = 10*\frac{2x10^3}{1x10^3+2x10^3} = 6{,}67V$$

$$R_A = \frac{R_2R_1}{R_1+R_2} = \frac{1x10^3*2x10^3}{1x10^3+2x10^3} = 667\Omega$$

$$E_B = E\,\frac{R_4}{R_3+R_4} = 10*\frac{100}{400+100} = 2V$$

$$R_B = \frac{R_3R_4}{R_3+R_4} = \frac{400*100}{400+100} = 80\Omega$$

$$E_A - V_{D1} - E_B = I_{D1}\left(R_A+R_B\right)$$

$$\rightarrow I_{D1} = \frac{E_A - V_{D1} - E_B}{\left(R_A+R_B\right)} = \frac{E_A - 0{,}6 - E_B}{\left(R_A+R_B\right)} = 5{,}45mA$$

Exercice 8

Les caractéristiques du circuit **Figure 8** sont e(t) = sin ωt, $R_1 = R_2 = 100\ \Omega$. Le modèle de la diode passante est caractérisé par une tension continue 0,6 V et $R_f = 0\ \Omega$.

a. représentez u(t) sans diode D.
b. Même question pour R_2 remplacé par D (T = 25°C).
c. Même question pour R_2 et D connectées en parallèle.

Solution :

(a). u(t) = 0,5 sin ωt
(b). pour e ≥ 0,6 V, u(t) = 0,6 V ; pour e ≤ 0,6 V, u(t) = e
(c). u(t) = 0,5 sin ωt

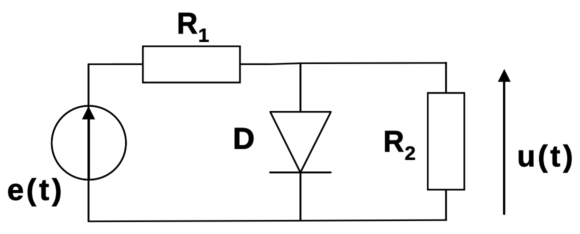


Figure 8 : schéma exercice 8

Solution (8.a)

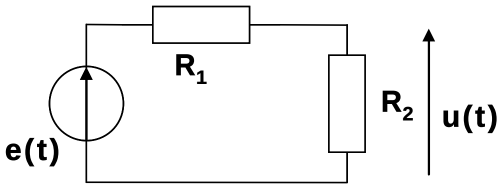
Les caractéristiques du circuit Figure 8 sont e(t) = sin ωt, $R_1 = R_2 = 100\ \Omega$. Le modèle de la diode passante est caractérisé par une tension continue 0,6 V et $R_f = 0\ \Omega$.

Représentez u(t) sans diode D.

Solution :

u(t) = 0,5 sin ωt

- Schéma sans la diode D :



- La tension u(t) sera:

$$i(t) = \frac{e(t)}{R_1 + R_2}$$

$$u(t) = i(t)R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} e(t) = \frac{100}{100+100} \sin wt = 0{,}5 \sin wt$$

Solution (8.b)

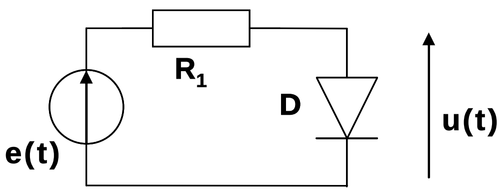
Les caractéristiques du circuit **Figure 8** sont e(t) = sin ωt, $R_1 = R_2 = 100\ \Omega$. Le modèle de la diode passante est caractérisé par une tension continue 0,6 V et $R_f = 0\ \Omega$.

Même question pour R_2 remplacé par D (T = 25°C).

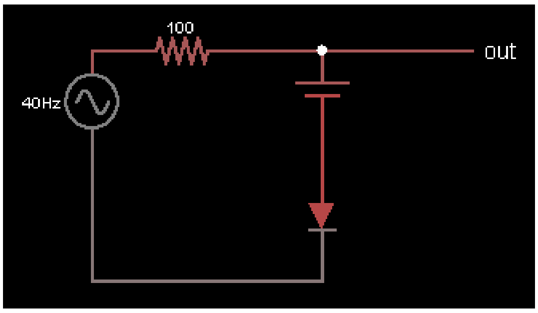
Solution :

Pour e ≥ 0,6 V, u(t) = 0,6 V ; pour e ≤ 0,6 V, u(t) = e

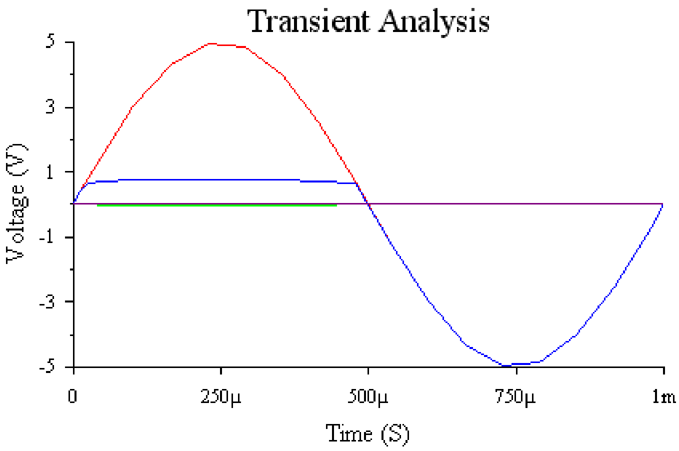
- Même question pour R_2 remplacé par D (T = 25°C) :



- On remplace la diode par une diode idéal et une source de tension DC V_D=0,6V :



- La tension sur la résistance R = 100Ω, la tension de sortie et le courant sur la diode sont représentées pour une tension e(t)= sin ωt:



- Pour e ≥ 0,6 V ⟶ u(t) = 0,6 V ; pour e ≤ 0,6 V ⟶ u(t) = e.

Solution (8.c)

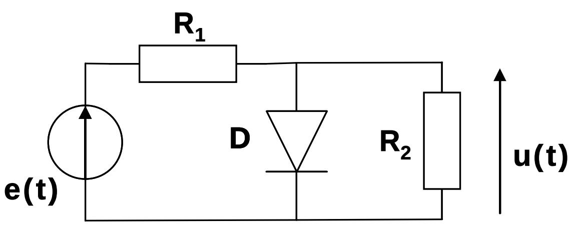
Les caractéristiques du circuit **Figure 8** sont e(t) = sin ωt, R_1 = R_2 = 100 Ω. Le modèle de la diode passante est caractérisé par une tension continue 0,6 V et R_f = 0 Ω.

Même question pour R_2 et D connectées en parallèle.

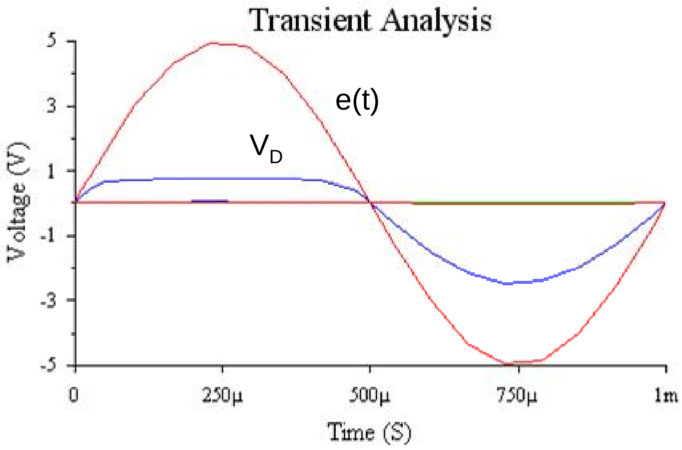
Solution :

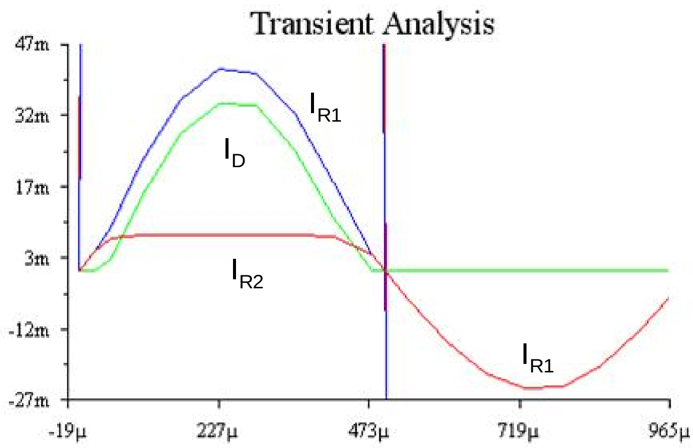
u(t) = 0,5 sin ωt

- Avec la diode D et la résistance R2 en parallèle :



- La tension sur la résistance R_1 = 100Ω, la tension de sortie, le courant sur la diode et sur la résistance R_2= 100Ω sont représentées pour une tension e(t)= e.sin ωt:





- Pour e ≥ 0,6 V → u(t) = 0,6 V ; pour e ≤ 0,6 V → u(t) = 0,5e.

Exercice 9

Les caractéristiques du circuit de la

Figure 9 sont E = 5 V, R_1 = 1 kΩ, R_2 = 100 kΩ, C = 100 pF et la fréquence vaut 1000 Hz. Représentez u(t) superposé à e(t).

Solution :

Conférer Figure 10.

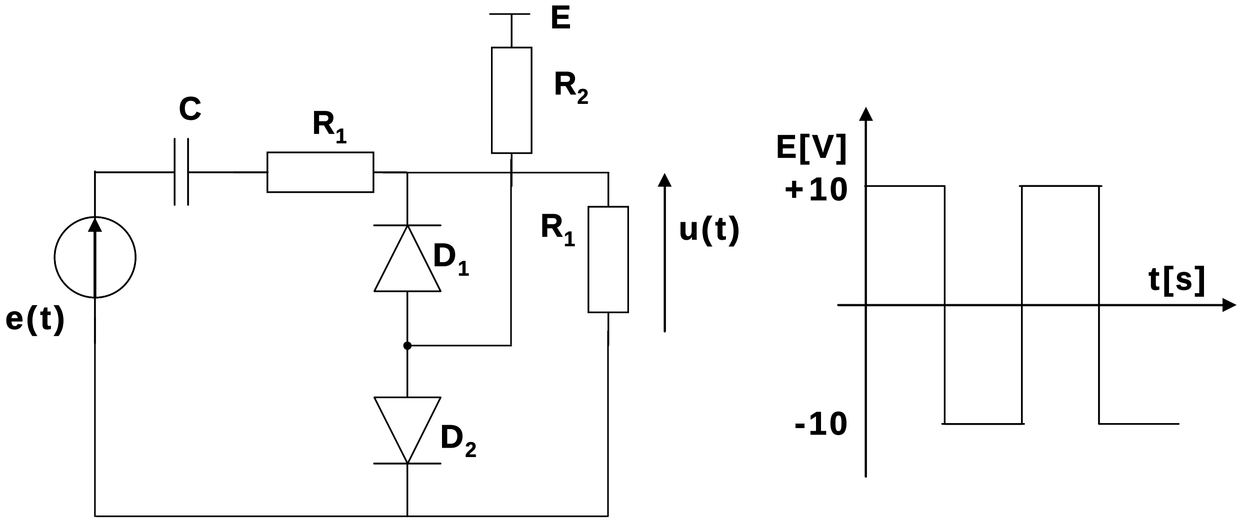


Figure 9 : schéma exercice 9

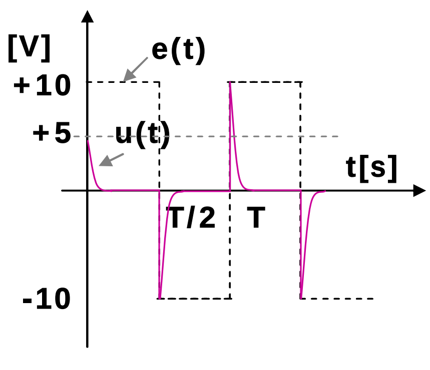


Figure 10 : solution exercice 9

Solution (9)

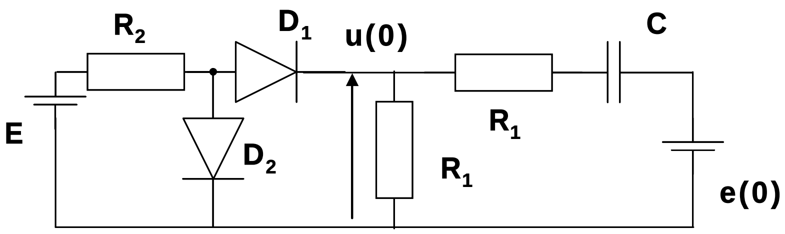
Les caractéristiques du circuit de la

Figure 9 sont E = 5 V, R_1 = 1 kΩ, R_2 = 100 kΩ, C = 100 pF et la fréquence vaut 1000 Hz. Représentez u(t) superposé à e(t).

Solution :

Conférer Figure 10.

- Avec $V_C(0)$=0V, e(0)=10V, E=5V et diodes idéales, seulement la diode $D_{2.}$ est en conduction et la diode D_1 bloquée :



$$e(0)=V_C(0)+i_{R1}(0)2R_1 \rightarrow u(0)=i_{R1}(0)R_1=\frac{e(0)-V_C(0)}{2}=\frac{10-0}{2}=5V$$

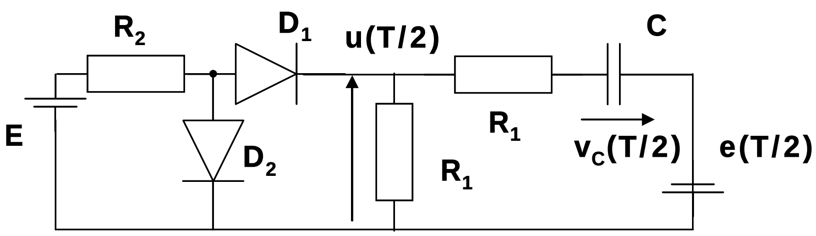
$$i_{R1}(0)=\frac{u(0)}{R_1}=\frac{5}{10^3}=5mA$$

- La capacité sera chargée après un temps de charge $2R_1C$ = 0,2µs >> 0,5ms=T/2 :

$$\left.\begin{aligned}
v_C(t)&=Ae^{-\frac{t}{RC}}+B\\
v_C(\infty)&=B=10V\\
v_C(0)&=A+B=0V\\
A&=v_C(0)-B=0-10=-10
\end{aligned}\right\}\; v_C(t)=Ae^{-\frac{t}{RC}}+B=-10e^{-\frac{t}{0,2x10^{-6}}}+10$$

$$v_C(0{,}5ms)=-10e^{-\frac{0,5x10^{-3}}{0,2x10^{-6}}}+10=10V$$

- La capacité C sera charge avec une tension v_C(T/2)=10V au moment de l'inversion de tension e(T/2)=-10V. Dés l'inversion de tension (T/2) la diode D_2 est bloquée et D_1 conduit :



- Le calcul de la tension u(T/2) par l'application du principe de superposition des tensions :

$$
\begin{aligned}
u(T/2) = i_u(T/2)R_1 &= \frac{E}{R_2 + R_1 \| R_1} R_1 + \frac{e(T/2) - V_C(T/2)}{R_1 + R_2 \| R_1} R_1 \\
&= \frac{E}{\frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{2}} + \frac{e(T/2) - V_C(T/2)}{1 + \frac{1}{\frac{R_1}{R_2} + 1}} = \frac{5}{\frac{10^5}{10^3} + \frac{1}{2}} + \frac{(-10) - 10}{1 + \frac{10^5}{\frac{10^3}{10^5} + 1}} \\
&= -10V
\end{aligned}
$$

- Ce qui nous montre que la diode D2 est effectivement bloquée.
- La capacité sera déchargée sur une résistance R2‖R1+R1 et par la suite chargée à la tension VC(T)=10V. Lorsque la capacité sera chargée, la tension u(T) devient égale à 0V.

Exercice 10 : examen juin 2003

En utilisant le modèle réel de la diode, calculez la tension V_1 et le courant à travers les diodes du circuit Figure 11**(a)** sachant que pour $I_D = 1$ mA, $V_D = 0{,}7$ V. Le facteur n (identique pour toutes les diodes) vaut 1,97, la température 40 °C, E et R valent respectivement 6 V et 2 kΩ (2 itérations suffisent).

Solution :

$V_1 = 2{,}22$ V ; $I_D = 1{,}89$ mA.

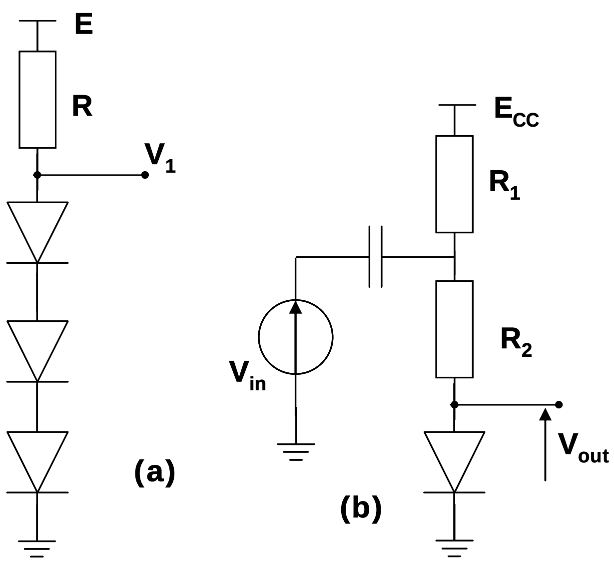


Figure 11 : schéma exercices 10 et 11

Solution (10)

En utilisant le modèle réel de la diode, calculez la tension V_1 et le courant à travers les diodes du circuit Figure 11**(a)** sachant que pour I_D = 1 mA, V_D = 0,7 V. Le facteur n (identique pour toutes les diodes) vaut 1,97, la température 40 °C, E et R valent respectivement 6 V et 2 kΩ (2 itérations suffisent).

Solution :

V_1 = 2,22 V ; I_D = 1,89 mA

- Charge de l'électron

$$q = 1{,}6x10^{-19}C$$

- Constante de Boltzmann :

$$k = 1{,}38x10^{-23}\frac{eV}{K}$$

- Tension thermique V_T(@40°C) :

$$V_T(300°K) = \frac{kT}{q} = \frac{1{,}38x10^{-23}300}{1{,}6x10^{-19}} = 26mV$$

$$V_T(40°C) = V_T(300°K)\frac{40}{25} = 26x10^{-3} * \frac{40}{25} = 34{,}5mV$$

- Pour I_D = 1 mA @300°K nous avons V_D = 0,7 V avec un facteur n (identique pour toutes les diodes) de1,97. Il nous manque le courant de fuite I_S :

$$I_D[A] = I_S\left[exp\left(\frac{qV_D}{nkT}\right)-1\right] = I_S\left[exp\left(\frac{V_D}{nV_T}\right)-1\right]$$

$$\rightarrow I_S = \frac{I_D}{exp\left(\frac{V_D}{nV_T}\right)-1} = \frac{1x10^{-3}}{exp\left(\frac{0{,}7}{1{,}97*34{,}5x10^{-3}}\right)-1} = 33{,}7nA$$

- Le courant maximal sans les diodes (donc V_1 = 0V) :

$$E = Ri \rightarrow i = \frac{E}{R} = \frac{6}{2x10^3} = 3mA$$

- Avec cette valeur on fait une première itération et obtient la tension de chaque diode :

$$I_D = I_S\left[exp\left(\frac{V_D}{nV_T}\right)-1\right] \rightarrow V_D = nV_T\ ln\left(\frac{I_D}{I_S}+1\right) = \left(1{,}97 * 34{,}5x10^{-3}\right) * ln\left(\frac{3x10-3}{33{,}7x10^{-9}}+1\right) = 078V$$

- Avec une tension de diode V_D=0,78V, on recalcule la tension V_1 et le courant I_D:

$$V_1 = 3V_D = 3 * 0{,}78 = 2{,}34V$$

$$E = Ri + V_1 \rightarrow i = \frac{E - V_1}{R} = \frac{6 - 2{,}34}{2x10^3} = 1{,}84mA$$

- Avec le courant I_D on réalise une deuxième itération pour obtenir V_D, V_1 et i:

$$I_D = I_S\left[exp\left(\frac{V_D}{nV_T}\right)-1\right] \rightarrow V_D = nV_T\ ln\left(\frac{I_D}{I_S}+1\right) = \left(1{,}97 * 34{,}5x10^{-3}\right) * ln\left(\frac{1{,}84x10^{-3}}{33{,}7x10^{-9}}+1\right) = 0{,}74V$$

$$V_1 = 3V_D = 3 * 0{,}74 = 2{,}22V$$

$$E = Ri + V_1 \rightarrow i = \frac{E - V_1}{R} = \frac{6 - 2{,}22}{2x10^3} = 1{,}89mA$$

Exercice 11

Le circuit de la Figure 11**(b)** possède les caractéristiques suivantes : E_{CC}= 20 V, R_1 = 10 kΩ, R_2 = 20 Ω, C = 1 nF. Calculez le gain en tension du circuit.

Solution :

$A_v = 0,4$

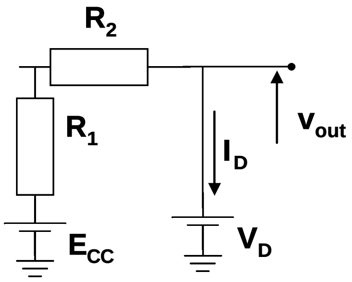
Solution (11)

Le circuit de la Figure 11**(b)** possède les caractéristiques suivantes : E_{CC}= 20 V, R_1 = 10 kΩ, R_2 = 20 Ω, C = 1 nF. Calculez le gain en tension du circuit.

Solution :

$A_v = 0{,}4$

- Analyse du point DC : la capacité représentée un circuit ouvert et la diode est remplacée par la tension de diode V_D (pour manque d'information sur la caractéristique de la diode) :



- On obtient le courant sur la diode :

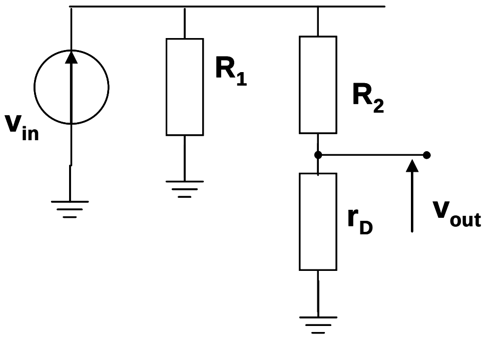
$$E_{CC} = I_D(R_1 + R_2) + V_D \rightarrow I_D = \frac{E_{CC} - V_D}{R_1 + R_2} = \frac{20 - 0{,}7}{1x10^3 + 20} = 1{,}93mA$$

- La résistance dynamique de la diode r_D (résistance pour le modèle « petits signaux » en utilisant l'expression analytique autour du point de travail V_D,I_D) :

$$I_D = I_S\left[exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1\right] \approx I_S\, exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) \rightarrow \frac{dI_D}{dV_D} = I_S \frac{1}{V_T} exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) = \frac{I_D}{V_T}$$

$$r_D = \left.\frac{dv_D}{di_D}\right|_Q \approx \frac{V_T}{I_D} = \frac{26x10^{-3}}{1{,}93x10^{-3}} = 13{,}5\Omega$$

- Le circuit équivalent « petits signaux » : on considère que à la fréquence de travail la capacité représentée une impédance de valeur négligeable et les sources de tension DC sont remplacées par des court-circuits :



- Le gain de tension $A_v = v_o / v_i$:

$$v_o = i_{r_D} r_D$$
$$v_i = i_{r_D} (r_D + R_2)$$
$$\frac{v_o}{r_D} = \frac{v_i}{(r_D + R_2)} \rightarrow A_V = \frac{v_o}{v_i} = \frac{r_D}{(r_D + R_2)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{R_2}{r_D}\right)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{20}{13{,}5}\right)} = 0{,}4$$

- Parce que R_2 n'est pas très grande par rapport à r_D on ne peut pas faire la simplification.