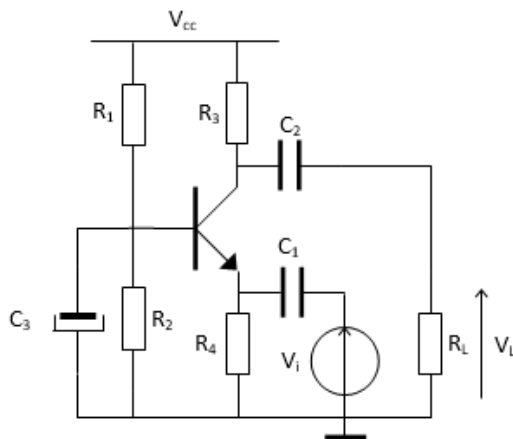


Examen SAPH-232

Electronique analogique et physique des semi-conducteurs

Durée : 3h. Aucun document n'est autorisé, l'utilisation de la calculatrice est autorisée.

I. Amplificateur



AN :

$$R_3 = 1k\Omega$$

$$R_L = 100\Omega$$

$$C_1 = 100nF$$

$$C_2 = 100nF$$

$$C_3 = 100\mu F$$

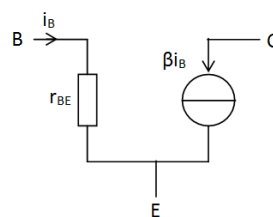
$$V_{cc} = 15V$$

$$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\beta = 100$$

- 1°) Identifier le type exact de transistor et nommer en les repérant sur un schéma les trois électrodes.
- 2°) Redessiner le circuit pour l'étude de la polarisation. Comment se nomment les condensateurs C_1 , C_2 et C_3 ? Comment se comportent-ils vis-à-vis du régime de polarisation ?
- 3°) Remplacer le pont R_1, R_2 par son générateur de Thévenin équivalent. Etablir l'équation de la droite d'attaque (statique) $I_B = f(V_{BE})$.
- 4°) Idem pour la droite de charge statique $I_C = f(V_{CE})$.
- 5°) On souhaite imposer un courant I_{P0} dans le pont R_1, R_2 très supérieur au courant I_{B0} : $I_{P0} = 100I_{B0}$. Calculer les valeurs des composants R_1, R_2 et R_4 permettant de fixer le point de polarisation : ($I_{C0} = 5mA$; $V_{CE0} = 5V$).
- 6°) Etablir un schéma équivalent du montage valable en régime de petits signaux dans la bande passante de l'amplificateur. Rappeler les hypothèses faites pour établir ce schéma équivalent. Un modèle du transistor valable dans ce régime de fonctionnement est rappelé ci-dessous :



7°) Rappeler la relation liant le courant I_B à la tension V_{BE} en régime statique (équation de la jonction de diode). Montrer que l'on peut en déduire la relation : $r_{BE} = \frac{V_T}{I_{B0}}$. Calculer la valeur de r_{BE} à 25°C.

8°) Calculer le gain en tension à vide puis en charge de l'amplificateur dans la bande passante. Faire les applications numériques.

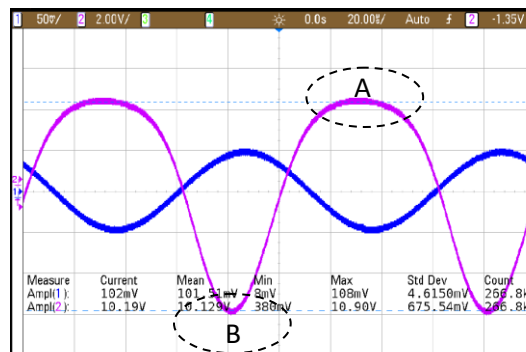
9°) Calculer les impédances d'entrée et de sortie. Faire les applications numériques.

10°) Représenter sur un même graphe l'allure de l'évolution temporelle de la tension d'entrée, de la tension aux bornes de R_3 , et de R_2 en régime sinusoïdal de petits signaux dans la bande passante.

11°) Etablir l'équation de la droite de charge dynamique $i_C = f(v_{CE})$.

12°) Tracer sur un même graphe la droite de charge statique et dynamique. Placer le point de polarisation. En déduire la dynamique crête à crête de sortie du montage. Quel phénomène limite cette dynamique ?

13°) Interpréter l'oscillogramme ci-dessous représentant le signal de sortie (Voie 2) de l'amplificateur attaqué par un signal d'entrée (Voie 1) sinusoïdal. Quels phénomènes interviennent au niveau des distorsions A et B ? Représenter l'allure du spectre du signal de sortie.

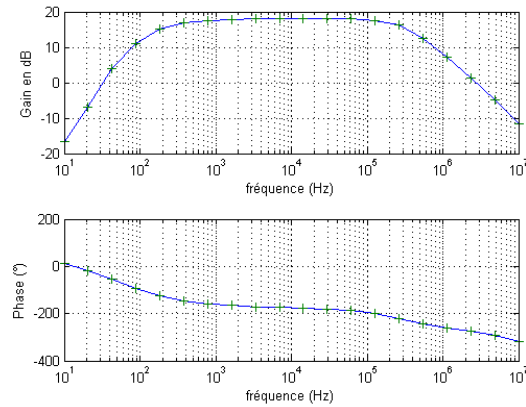


14°) On souhaite délivrer à la charge R_L une puissance de 20dBm. Quelle devrait être l'amplitude de la tension de sortie nécessaire en régime sinusoïdale ? Quelle serait la valeur efficace de cette tension ?

15°) On s'intéresse à la limite haute de la bande passante de l'amplificateur. Proposer un nouveau schéma équivalent (modèle de Giacoletto) du transistor valable en haute fréquence. (On prendra en compte les effets capacitifs des jonctions au travers des condensateurs équivalents $C_{B'E}$, $C_{B'C}$ et l'imperfection de résistance d'accès à la base $r_{BB'}$).

16°) Redessiner un schéma équivalent en petits signaux haute fréquence de l'amplificateur. Cet amplificateur subi-t-il l'effet Miller ?

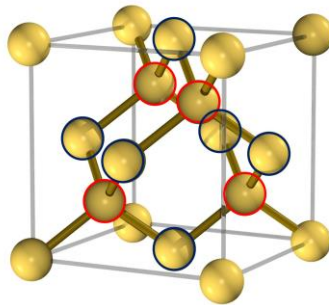
17°) Interpréter le diagramme de Bode du montage amplificateur relevé ci-dessous. Quelle est la bande passante à -3dB de cet amplificateur ? Quel(s) phénomène(s) limite(nt) cette bande passante ?



18°) La tension de sortie de l'amplificateur peut s'écrire $V_s = A.V_E + B.V_E^2$. Calculer le taux de distorsion harmonique de l'amplificateur.

II. Le silicium

On donne la représentation suivante de la maille de silicium.



1°) Décrire sa structure cristallographique (réseau formé, types de sites occupés par les atomes).

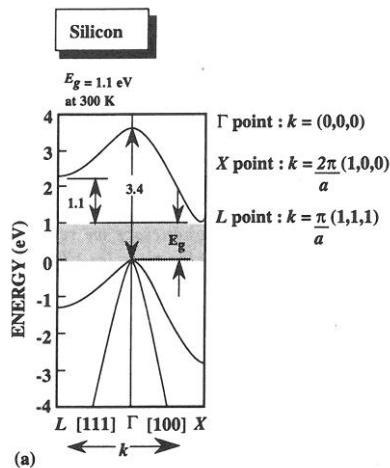
2°) Calculer le nombre d'atomes par maille, puis par unité de volume et enfin la masse volumique du silicium. Comparer cette dernière valeur à celle déterminée macroscopiquement.

3°) Calculer la compacité de cette structure cristallographique.

Informations complémentaires :

On donne le paramètre de maille du silicium, sa masse molaire ainsi que la masse volumique déterminée macroscopiquement : $a = 0,357 \text{ nm}$, $M = 28,09 \text{ g.mol}^{-1}$ et $\rho = 2,33 \text{ g.cm}^{-3}$. On rappelle que la compacité est la fraction volumique occupée par les atomes dans la maille (dans un modèle de sphères dures).

4°) On donne la structure de bande du silicium :



- Que représente-t-elle ?
- La zone grisée du diagramme est parfois dénommée « gap ». Quel est son nom, en français ? Ce « gap » est-il direct ou indirect ?
- Comment nomme-t-on les autres zones du diagramme ?

La diode

5°) Qu'appelle-t-on semi-conducteurs intrinsèques ? A quelle famille de semi-conducteurs s'opposent-ils ?

6°) Schématiser une jonction PN. Comment nomme-t-on usuellement la barrière de potentiel ? Expliquer son origine. De quels paramètres physiques dépend-elle ?

On s'intéresse au comportement AC d'une diode, et en particulier à son fonctionnement en inverse.

On donne les relations suivantes (avec les mêmes notations qu'en cours).

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon(V_{bi} - V)}{q_e}} \left(\frac{N_d + N_a}{N_a N_d} \right)^{1/2}$$

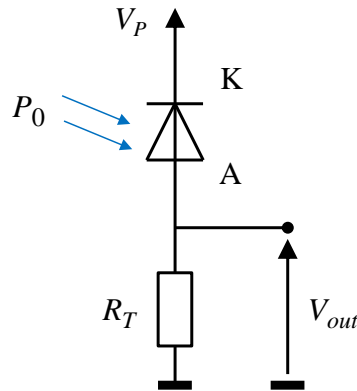
$$C_j = A\varepsilon \frac{1}{\left(\frac{2\varepsilon(V_{bi} - V)}{q_e} \frac{N_d + N_a}{N_a N_d} \right)^{1/2}}$$

7°) Expliquer les différents termes de ces équations, le lien entre elles et ce qu'elles impliquent physiquement ou bien sur l'utilisation du composant.

III. Mise en œuvre d'une photodiode.

1°) Démontrer par un raisonnement simple la formule donnant l'expression du courant photonique produit par une photodiode recevant une puissance optique P_0 , dans le cas d'un rayonnement monochromatique de longueur d'onde dans le vide λ_0 .

On considère le montage simple de la figure suivante :



2°) Comment doit être mise en œuvre la photodiode ? Justifier la réponse d'après le principe de fonctionnement d'une photodiode.

3°) Déterminer l'expression de la tension V_{out} en fonction de P_0 et des éléments du montage proposé.

4°) Quelle précaution doit-on prendre vis-à-vis des paramètres du système pour bien avoir le fonctionnement souhaité ?

5°) Rappeler le modèle dynamique équivalent d'une photodiode. En déduire le schéma petits-signaux du circuit.

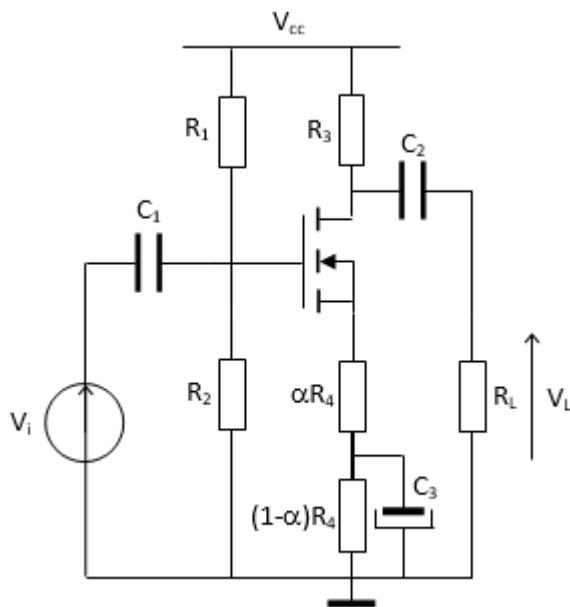
6°) Etudier la réponse du système et en déduire le temps de réponse du montage.

Examen SAPH-232

Electronique analogique et physique des semi-conducteurs

Durée : 3h. Aucun document n'est autorisé, l'utilisation de la calculatrice est autorisée.

I. Amplificateur



AN :

$$R_3 = 1k\Omega$$

$$R_L = 100\Omega$$

$$C_1 = 100nF$$

$$C_2 = 100nF$$

$$C_3 = 100\mu F$$

$$V_{cc} = 15V$$

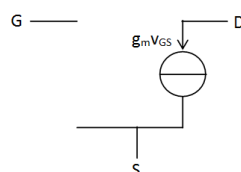
$$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$I_{DSS} = 1mA$$

$$V_T = 2V$$

- 1°) Identifier le type exact de transistor et nommer en les repérant sur un schéma les trois électrodes.
- 2°) Redessiner le circuit pour l'étude de la polarisation. Comment se nomment les condensateurs C_1 , C_2 et C_3 ? Comment se comportent-ils vis-à-vis du régime de polarisation ?
- 3°) Exprimer la valeur du courant de drain dans un transistor à effet de champ fonctionnant en régime source de courant.
- 4°) Etablir l'équation de la droite de charge statique $I_D = f(V_{DS})$.
- 5°) On souhaite imposer un courant I_{P0} dans le pont R_1, R_2 de $15\mu A$. Calculer les valeurs des composants R_1 , R_2 et R_4 permettant de fixer le point de polarisation : ($I_{D0} = 5mA$; $V_{DS0} = 5V$).
- 6°) Etablir un schéma équivalent du montage valable en régime de petits signaux dans la bande passante de l'amplificateur. Rappeler les hypothèses faites pour établir ce schéma équivalent. Un modèle du transistor valable dans ce régime de fonctionnement est rappelé ci-dessous :



7°) Rappeler la définition puis calculer la valeur de g_m .

8°) Calculer le gain en tension à vide puis en charge de l'amplificateur dans la bande passante. Faire les applications numériques pour $\alpha = 0,5$.

9°) Calculer les impédances d'entrée et de sortie dans la bande passante. Faire les applications numériques pour $\alpha = 0,5$.

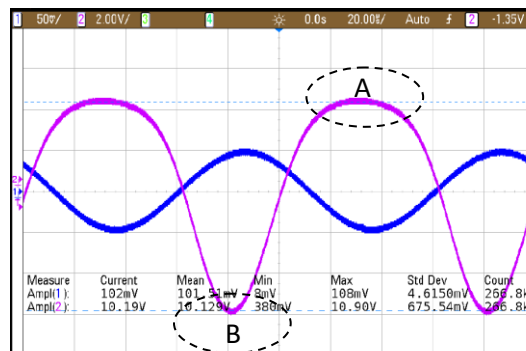
10°) Représenter sur un même graphe l'allure de l'évolution temporelle de la tension d'entrée, de la tension aux bornes de R_3 , et de R_L en régime sinusoïdal de petits signaux dans la bande passante.

11°) Etablir l'équation de la droite de charge dynamique $i_D = f(v_{DS})$.

12°) Tracer sur un même graphe la droite de charge statique et dynamique. Placer le point de polarisation. En déduire la dynamique crête à crête de sortie du montage ($\alpha = 0,5$). Quel phénomène limite cette dynamique ?

13°) A quoi peut servir le paramètre de réglage α ?

14°) Interpréter l'oscillogramme ci-dessous représentant le signal de sortie (Voie 2) de l'amplificateur attaqué par un signal d'entrée (Voie 1) sinusoïdal. Quels phénomènes interviennent au niveau des distorsions A et B ? Représenter l'allure du spectre du signal de sortie.



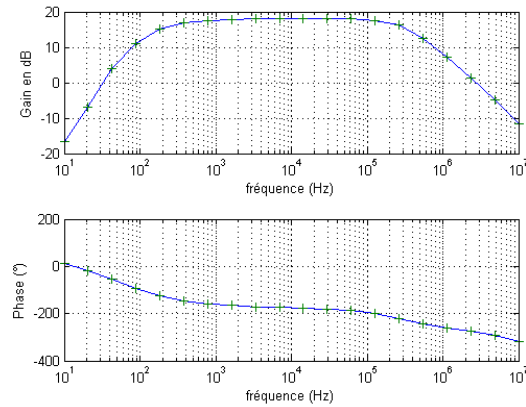
15°) On souhaite délivrer à la charge R_L une puissance de 20dBm. Quelle devrait être l'amplitude de la tension de sortie nécessaire en régime sinusoïdale ? Quelle serait la valeur efficace de cette tension ?

16°) On s'intéresse à la limite haute de la bande passante de l'amplificateur. Proposer un nouveau schéma équivalent du transistor valable en haute fréquence.

17°) Dans la situation où $\alpha = 0$ redessiner un schéma équivalent en petits signaux haute fréquence de l'amplificateur.

18°) On s'intéresse maintenant à la limite basse de la bande passante. En ne considérant que l'effet de C_1 (c'est-à-dire que C_2 et C_3 sont supposés se comporter comme des courts-circuits) redessiner un schéma équivalent et déterminer le type de comportement fréquentiel de l'amplificateur ainsi que la fréquence de coupure associée. (On a toujours $\alpha = 0$)

19°) Interpréter le diagramme de Bode du montage amplificateur relevé ci-dessous. Quelle est la bande passante à -3dB de cet amplificateur ? Quel(s) phénomène(s) limite(nt) cette bande passante ?



20°) La tension de sortie de l'amplificateur peut s'écrire $V_s = A.V_E + B.V_E^3$. Calculer le taux de distorsion harmonique de l'amplificateur.

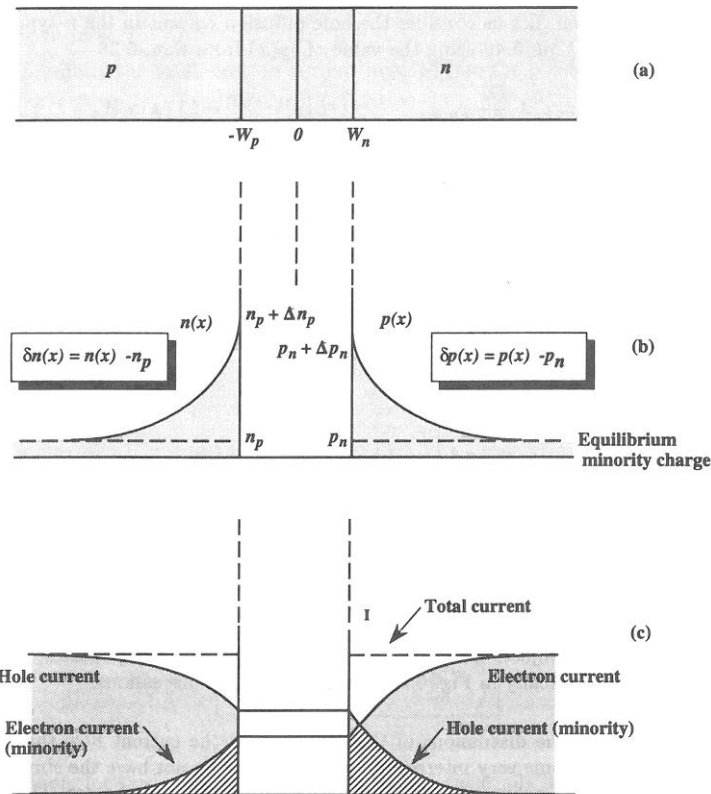
II. Semi-conducteur

1°) Le silicium cristallin constitue la base de l'électronique moderne. Décrire à l'aide d'un schéma sa structure cristallographique. Calculer le nombre d'atomes par maille, puis par unité de volume et enfin la masse volumique du silicium. Comparer cette dernière valeur à celle déterminée macroscopiquement.

Informations complémentaires :

On rappelle que la structure cristallographique du silicium est de type diamant (c'est-à-dire cfc avec occupation de la moitié des sites tétraédriques). On donne son paramètre de maille, la masse molaire du silicium ainsi que la masse volumique déterminée macroscopiquement : $a = 0,357 \text{ nm}$, $M = 28,09 \text{ g.mol}^{-1}$ et $\rho = 2,33 \text{ g.cm}^{-3}$.

2°) La figure suivante décrit des phénomènes physiques dans une « jonction p-n ». Qu'entend-on par ce terme ? Décrire les phénomènes physiques en jeu dans cette jonction. Expliciter les termes utilisés sur la figure. Donner l'allure du potentiel électrique en fonction de x et représenter les charges électriques présentes dans la jonction.



3°) On donne l'expression du paramètre usuel V_{bi} caractérisant une jonction p-n : $V_{bi} = \frac{k_B T}{q_e} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2}$

Comment le dénomme-t-on, et que désignent les six grandeurs présentes dans la formule permettant de le calculer ? Le représenter sur la courbe tracée à la question précédente.

On donne : $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$, $N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

4°) Représenter la largeur de la zone de charge d'espace sur la figure de la question 2°, ou bien indiquer comment la calculer à partir de certains des paramètres de cette figure.

La largeur de la zone de charge d'espace est donnée par la formule :

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_r (V_{bi} - V_{ext})(N_d + N_a)}{q_e N_d N_a}}$$

On donne : $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^{-9}} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ et $\epsilon_r = 11,9$. Nommer ces deux grandeurs. Calculer W pour les 3 valeurs suivantes de V_{ext} : 0 V , $0,5 \text{ V}$ et -4 V . A quoi peut servir de calculer la largeur de la zone de charge d'espace ?

5°) Donner l'équation $I(V)$ (caractéristique statique) du composant électrique correspondant à cette jonction p-n. Comment nomme-t-on cette équation ? Et comment nomme-t-on ce composant ?

III. Photodiode.

On considère un flux lumineux monochromatique, de longueur d'onde dans le vide λ_0 , et l'on suppose qu'il arrive une puissance optique, notée P_0 , sur la photodiode.

1°) Déterminer le flux de photons incidents (noté ϕ_0) représentant le nombre de photons par unité de temps et unité de surface, arrivant sur le photorécepteur.

2°) La surface du photorécepteur présente un coefficient de réflexion énergétique R . De quoi dépend ce coefficient de réflexion ? Quel est le flux de photons (noté ϕ_{in}) pénétrant dans le détecteur ?

3°) Rappeler quelle est la structure d'une photodiode. Qu'appelle-t-on photodiode PIN ?

4°) Expliquer le principe de la détection de photons et en déduire l'intensité du courant en sortie, en précisant bien les hypothèses faites. Pourquoi utilise-t-on des photodiodes PIN ?

5°) Établir l'expression de la sensibilité en A/W de la photodiode en fonction de la longueur d'onde.

6°) Selon les gammes de longueur d'onde, peut-on utiliser n'importe quel type de matériau ? Existe-t-il des photodiodes à base de silicium ?

7°) Rappeler la caractéristique statique courant/tension d'une photodiode et indiquer comment elle fonctionne selon les cadrans considérés. Dans quel cadran se situe le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque ?

8°) Quel est le schéma équivalent petits signaux d'une photodiode en régime dynamique ?