

1 Conducteurs et semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux qui ont une conductivité électrique intermédiaire entre celle des isolants et celle des conducteurs. Comment expliquer ces différences de conductivité ?

Document 1 – Bandes d'énergie

Le comportement électrique des conducteurs, des semi-conducteurs et des isolants est modélisé par la théorie des bandes énergétiques. Selon ce modèle, les niveaux d'énergie des électrons des atomes d'une structure cristalline forment des bandes d'énergie appelées bandes permises. Les bandes responsables des propriétés conductrices sont la bande de valence (BV) et la bande de conduction (BC). Les énergies comprises entre deux bandes permises constituent une bande interdite (BI). Seuls les électrons de plus hautes énergies, présents dans la bande de conduction, peuvent se détacher de la structure cristalline et participer à la conduction du courant électrique.

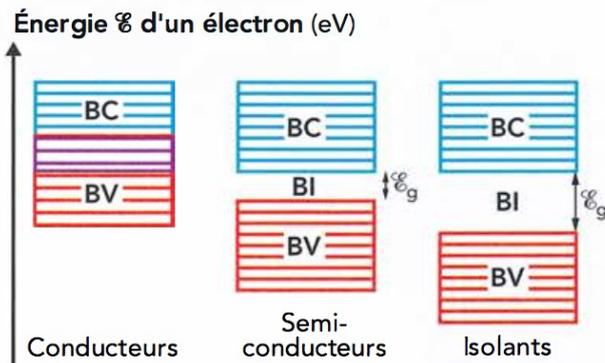


FIG. 1 – Bande de conduction (BC), de valence (BV) et bande interdite (BI) d'un électron dans une structure cristalline.

Pour les conducteurs, les bandes de valence et de conduction se chevauchent. Ainsi, certains électrons sont libres d'évoluer dans la structure cristalline (cas des métaux). En revanche, pour les semi-conducteurs et les isolants, les bandes de valence et de conduction sont séparées par une bande interdite. La différence entre semi-conducteur et isolant est due à la valeur \mathcal{E}_g de cette bande interdite, voisine de 1 eV pour les semi-conducteurs et de 6 eV pour les isolants.

Document 2 – Dopage d'un semi-conducteur

Un réseau monocristallin d'atomes de silicium, Si, est un semi-conducteur. L'atome de silicium ayant quatre électrons de valence, il établit quatre liaisons covalentes avec quatre atomes voisins. Un semi-conducteur au silicium a une conductivité quasi nulle. Afin d'augmenter sa conductivité, on insère dans la structure cristalline des

atomes d'autres éléments, appelés dopants.

Pour un semi-conducteur au silicium dopé au phosphore, un atome de phosphore, P, remplace un atome de silicium dans le réseau. L'atome P ayant cinq électrons de valence, il forme quatre liaisons covalentes avec des atomes de silicium voisins ; il reste un électron libre qui peut participer à la conduction électrique. L'atome de phosphore étant donneur d'électron, on parle de dopage de type n (n pour négatif).

Par un raisonnement analogue, un atome dopant possédant trois électrons de valence, comme le Bore, B, conduit à un déficit d'électron de valence dans le réseau, appelé trou. Ce trou peut être comblé par un électron de valence d'un atome de silicium voisin, déplaçant ainsi le trou. L'atome de bore étant accepteur d'électron, on parle de dopage de type p (p pour positif).

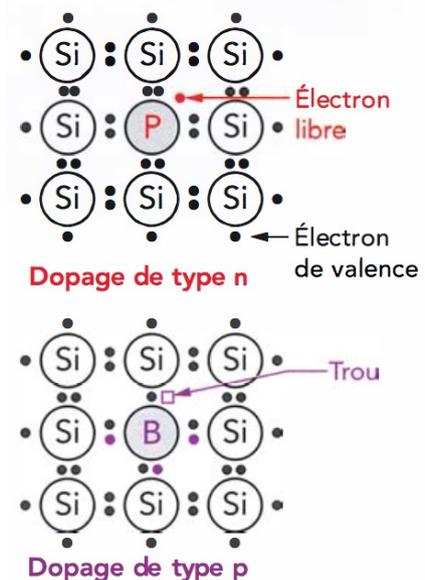


FIG. 2 – Dopages n ou p du silicium.

Les éléments dopants génèrent des niveaux d'énergies dans la bande interdite. Ces niveaux sont proches des bandes de valence ou de conduction.



FIG. 3 – Niveaux d'énergie dans la bande interdite.

2 La diode

La diode est le plus simple des composants formés à partir de semi-conducteurs. Ce composant est formé d'une « jonction pn », c'est-à-dire d'un semi-conducteur dopé p et d'un semi-conducteur dopé n, placés en série. Voyons maintenant le comportement électrique d'un tel composant.

2.1 Vérification des composants

- Une **diode** est un composant dont le symbole est :

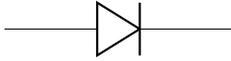


FIG. 4 – Symbole d'une diode.

- Voici quelques diodes de formes diverses :

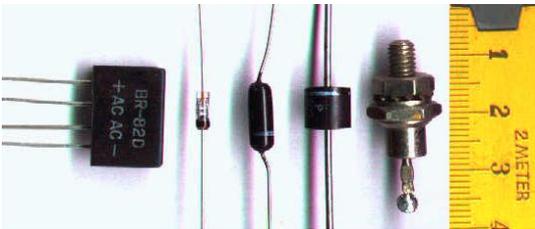


FIG. 5 – Différentes formes de diodes.

- La **barre** sur le schéma correspond à la barre sur le composant (la cathode).

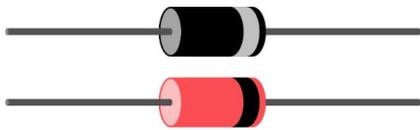


FIG. 6 – Schéma d'une diode.

- La flèche est « dans le sens » du courant quand la diode est dans le sens **passant**.

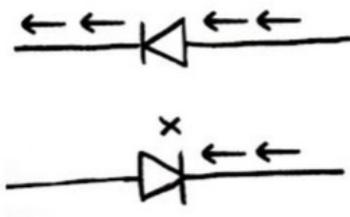


FIG. 7 – Sens passant et sens bloqué d'une diode.

- Pour **tester** la diode, il faut la brancher sur un multimètre en déplaçant le commutateur rotatif sur le petit symbole de la diode, dans la gamme « ohmmètre » (flèche ci-dessous).



FIG. 8 – Test d'une diode. Bien noter le branchement des fils et la position du commutateur.

- **Réaliser ce test**, et bien noter le sens de branchement : fil noir sur l'anode, fil rouge sur la cathode !

a. Noter la valeur de la **tension de seuil** U_S , en volt (V)

- **Vérifier** au multimètre branché en ohmmètre les valeurs des résistances à disposition sur votre table.

b. Noter les valeurs des **résistances**, en kilohm ($k\Omega$). Noter le calibre utilisé pour ces mesures.

2.2 Caractéristique d'une diode

- On va réaliser le montage ci-dessous :

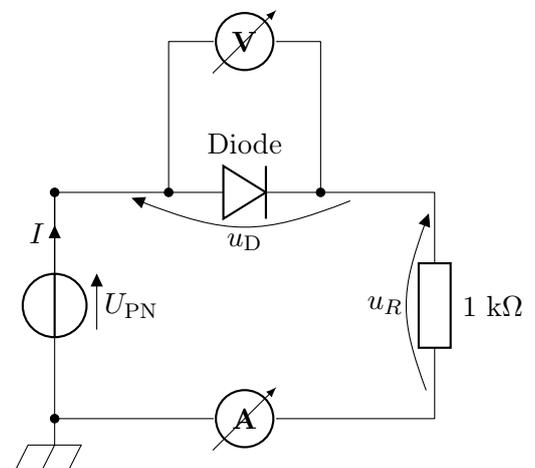


FIG. 9 – Mesures des tensions et intensité parcourant une diode.

- Conseil : dans un premier temps, commencez par réaliser une boucle ou maille comportant, dans l'ordre : le générateur ; la résistance de $1\text{ k}\Omega$; la diode ; l'ampère-mètre. Appel du professeur pour vérifier ce montage.
- Dans un deuxième temps, rajoutez le voltmètre aux bornes de la diode. Appel du professeur pour vérifier l'ensemble.
- Faire varier la tension U_{PN} entre les valeurs $-3,0\text{ V}$ et $6,0\text{ V}$, et relever pour chaque tension les valeurs de la tension U_D aux bornes de la diode et de l'intensité I qui la traverse.

c. Dresser un tableau de mesure sur votre compte-rendu.

d. Tracer le graphe $I = f(U_D)$ (appelé caractéristique de la diode).

e. Indiquer sur quelle partie de la caractéristique la diode :

- conduit le courant électrique (diode passante) ;
- bloque le courant électrique (diode bloquée).

f. Déterminer graphiquement la valeur de la tension aux bornes de la diode lorsqu'elle devient passante (appelée tension de seuil et notée U_S).

g. La diode n'est pas un dipôle symétrique. Justifier.

2.3 Fonctionnement interne d'une diode

Comme indiqué en introduction de l'activité, une diode est formée par la mise en contact de deux semi-conducteurs, l'un dopé n, l'autre dopé p. La zone de contact est appelée jonction.

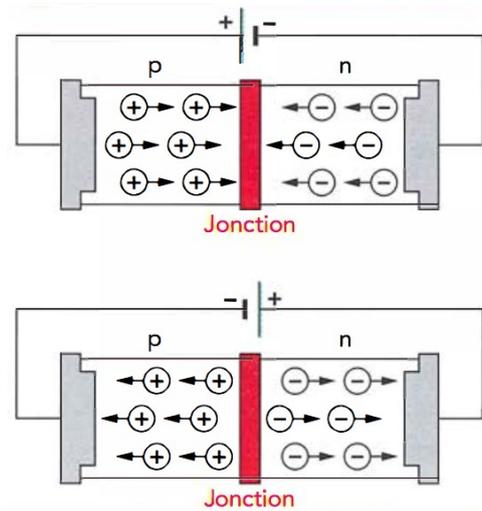


FIG. 10 – Déplacement des électrons et des trous.

Le semi-conducteur dopé n conduit le courant par « saut d'électrons », les charges négatives sont schématisées par \ominus . Le semi-conducteur dopé p conduit le courant par « saut de trous », assimilables à des charges positives schématisées par \oplus .

Lorsque l'on applique une tension électrique aux bornes de la diode, les électrons et les trous migrent en sens inverse. Selon la polarisation choisie, les porteurs de charge migrent vers la jonction ou s'en éloignent. Dans le premier cas, soit un électron « comble » un trou, soit les porteurs de charges traversent l'autre semi-conducteur jusqu'à atteindre l'électrode opposée. Dans le second cas, la jonction est dépeuplée de porteurs de charges.

h. Quel est le sens conventionnel de circulation du courant électrique ? Quel est celui des électrons ?

i. Sur les schémas ci-dessus, justifier le sens de déplacement des porteurs de charges (trous et électrons).

j. Une diode peut être passante ou bloquée. Associer, à chacun des deux états de la diode, l'un des schémas.

3 Redressement mono alternance

- Pour l'ensemble des montages, vous avez besoin de neuf fils : cinq longs et quatre courts. Les couleurs des isolants des fils n'ont pas d'influence sur le déplacement des électrons dans le conducteur, mais améliorent la lisibilité du montage, donc panachez les couleurs dans la mesure du possible.

- On va réaliser le montage ci-contre.

- On n'utilise pas un GBF, mais le mode « Sorties analogiques » de la console SYSAM-SP5, qui permet de disposer d'un GBF commandé par l'ordinateur. Pour cela, il faut par exemple brancher les fils sur les bornes SA1 et Masse, tel qu'indiqué en figure 12.

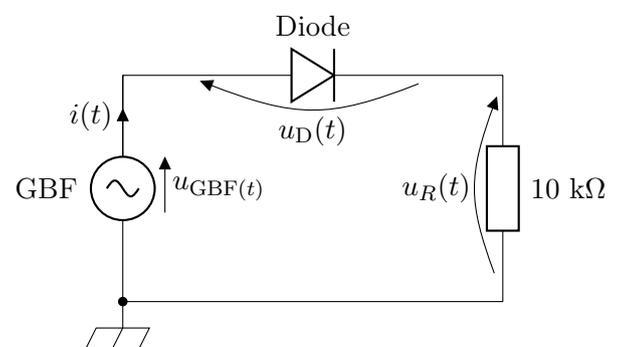


FIG. 11 – Redressement mono alternance.

Les autres composants se placent en série. On branchera les fils de mesure (qui vont correspondre aux

tensions u_{GBF} , u_D et u_R indiquées) à relier aux entrées de l'interface que dans un second temps (voir la question k).

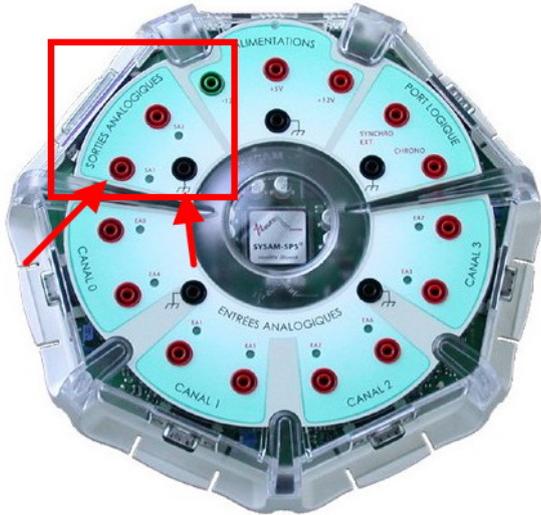


FIG. 12 – Sorties sur la console permettant de disposer d'un GBF.

- Allumer les PC, ouvrir Latis Pro, et dans la fenêtre « Paramètres », cliquer sur l'onglet « Émission » ; cocher sur « Mode GBF », puis activer la Sortie 1 (si c'est bien SA1 que vous utilisez).



FIG. 13 – Activation des sorties sous Latis Pro.



FIG. 14 – Forme et amplitudes du signal de sortie.

Attention ! Dès la sortie est active, le montage est sous tension !

Pensez par conséquent à désactiver la Sortie 1 en décochant « Sortie active » lors de toute modification du montage !

- Réglez la sortie sur une tension sinusoïdale, de fréquence $f = 500 \text{ Hz}$ et d'amplitude $U_m = 2,0 \text{ V}$ (donc une tension crête-à-crête de $4,0 \text{ V}$). Une fois ce réglage réalisé, si vous désactivez la sortie pour compléter votre montage électrique, le réglage est conservé.

k. On veut qu'une voie mesure la tension émise par le GBF. Où faut-il placer le fil de mesure et le fil de masse ? Indiquer sur le schéma du montage le branchement de cette voie 1.

l. On veut qu'une deuxième voie mesure l'intensité dans le montage. Est-ce possible directement ? Pourquoi ? Aux bornes de quel composant peut-on obtenir un signal proportionnel à l'intensité dans le montage ? Indiquer sur le montage le branchement de cette voie 2.

m. Peut-on obtenir la tension aux bornes de la diode ?

- Sous l'onglet « Acquisition », activer les voies utilisées et paramétrer le logiciel d'acquisition afin d'obtenir trois ou quatre périodes.

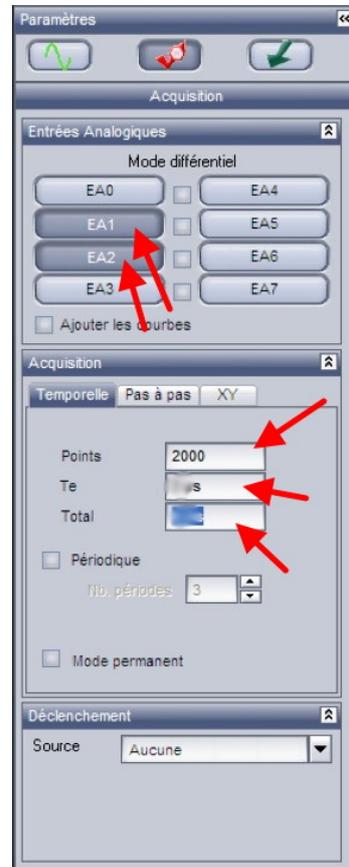


FIG. 15 – Paramètres d'acquisition.

- Lancer l'acquisition. Afin d'avoir des signaux parfaitement synchronisés, on peut utiliser un déclenchement.

Choisir la voie dont le signal est le plus net et régler en conséquence.

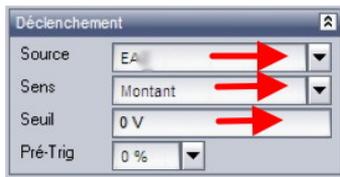


FIG. 16 – Utilisation d'un déclenchement.

n. Dans votre compte-rendu : noter les réglages utilisés.

- Utilisez la feuille de calcul pour calculer l'intensité i

4 Redressement bi alternance

- On va réaliser le montage suivant :

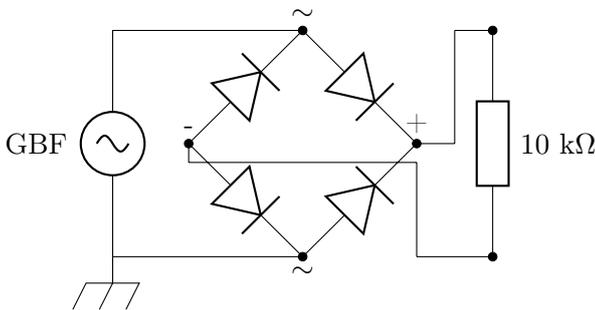


FIG. 17 – Redressement bi alternance.

- Les quatre diodes au centre sont intégrées dans un composant appelé « pont de diode ». Le branchement du pont de diode est le suivant : les bornes indiquées ~ sont les bornes vertes, les bornes indiquées + et - sont les bornes rouge et noire :

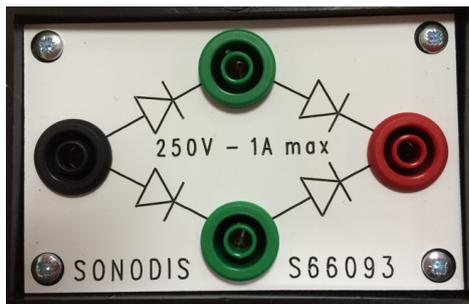


FIG. 18 – Pont de diode.

p. Pourquoi le sens de branchement des bornes vertes est sans importance ?

q. On veut qu'une voie mesure la tension émise par le GBF. Indiquez le branchement sur le montage.

r. On veut qu'une deuxième voie mesure la tension en sortie du pont de diode, chargé par la résistance de 10 kΩ. Pourquoi une telle mesure est impossible en l'état ?

avec la loi d'Ohm :

$$u_R = Ri \Leftrightarrow i = \frac{U_R}{R}$$

Renommer au passage la voie 1 en u_{GBF} et tracer u_{GBF} et i (sur des ordonnées distinctes!) en fonction du temps. C'est super plus beau et vous pouvez même imprimer cela (rajouter vos noms et prénoms sur vos impressions pour retrouver votre feuille!).

- Retirer toutes les courbes et désactiver la sortie 1.

o. Interpréter et conclure.

- Pour régler le problème, on utilise deux bornes de mesure de l'interface en mode différentiel, mode dans lequel la position de la masse dans le circuit importe peu. Cocher le mode différentiel dans Latis Pro, et indiquer le branchement des voies sur le montage.



FIG. 19 – Mode différentiel dans Latis Pro.

- Lancer l'acquisition. Mesurez la tension entre les crêtes des courbes.

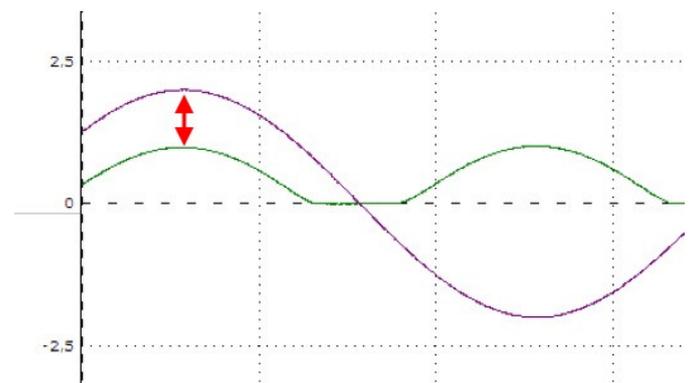


FIG. 20 – Courbes obtenues en sortie.

s. Interpréter ces courbes.

- Pour améliorer le résultat, augmenter l'amplitude de la tension délivrée par le GBF. Relancer l'acquisition.



FIG. 21 – Réglage de l'amplitude du GBF

t. Pourquoi parle-t-on à ce propos de redressement bi alternance ou double alternance? Quel est son intérêt?

- Brancher en parallèle sur la résistance de $10\text{ k}\Omega$ la boîte de condensateur. La boîte contient plusieurs condensateurs à connecter en parallèle, et leurs capacités s'additionnent. Les capacités sont exprimées en microfarads, symbole μF avec $1\ \mu\text{F} = 1 \times 10^{-6}\text{ F}$. Le condensateur a la propriété d'emmagasiner les électrons entre chaque alternance, et de le restituer lentement quand le courant décroît.

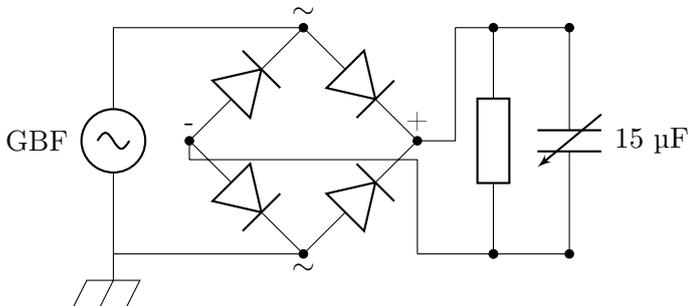


FIG. 22 – Lissage des tensions redressées.

- Relancer l'acquisition pour différentes capacités.

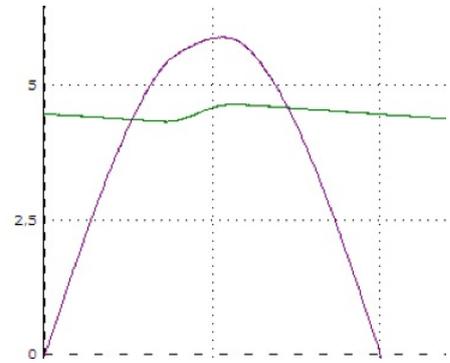


FIG. 23 – Lissage des tensions.

u. Conclusion : quelle capacité permet d'obtenir le meilleur lissage ?

v. Citez une utilisation possible de ce montage.

w. On veut modéliser le fonctionnement d'un chargeur d'accumulateurs (« piles rechargeables »). À l'aide du matériel à disposition, indiquer le montage à réaliser.

- Pont de diode ;
- Résistance $10\text{ k}\Omega$;
- Boîte de condensateurs $15\ \mu\text{F}$;
- Consoles SYSAM-SP5.

Exercices pour la séance n° 26 (jeudi 12 mai 2016)

25.1 N° 1 p. 148 et 149 : Conducteurs, semi-conducteurs, supraconducteurs

25.2 N° 2 p. 160 : Des supraconducteurs à l'imagerie médicale

25.3 N° 5 p. 162 : Niveau de Fermi d'un semi-conducteur intrinsèque

25.4 N° 6 p. 163 : Conception d'un détecteur d'inondation

Attention ! Dernier DS de l'année jeudi 19 mai 2016 !