

TP Propriétés électriques des matériaux

Conducteurs, semi-conducteurs, supraconducteurs

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

Inspiré du livre « TS spécialité » éditions Hachette éducation.

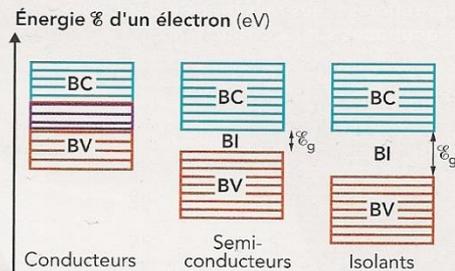
1. Conducteurs, semi-conducteurs, supraconducteurs

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.

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.

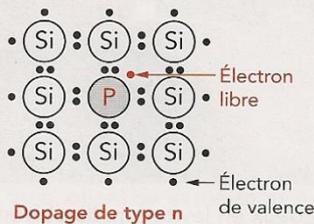


Bande de conduction (BC), de valence (BV) et bande interdite (BI) d'un électron dans une structure cristalline.

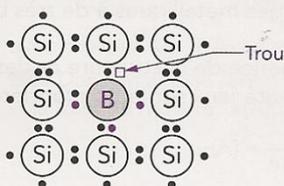
D'après J.-P. PEREZ et coll., « Électromagnétisme – Vide et milieux matériels », Masson, 1991.

Document 2

Dopage d'un semi-conducteur



Dopage de type n



Dopage de type p

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.

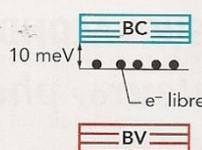
Pour un semi-conducteur au silicium dopé au phosphore, un atome de phosphore, P, remplace un atome de silicium dans le réseau. L'atome P ayant cinq électrons de valence, il forme quatre liaisons covalentes avec des atomes de silicium voisins; il reste un électron libre qui peut participer à la conduction 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).

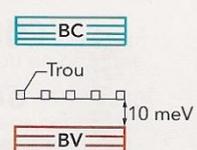
Les éléments dopants génèrent des niveaux d'énergies dans la bande interdite. Ces niveaux sont proches des bandes de valence ou de conduction.

D'après J.-P. PEREZ et coll.,
Électromagnétisme - Vide et milieux matériels,
Masson, 1991.

Dopage de type n



Dopage de type p



Document 3

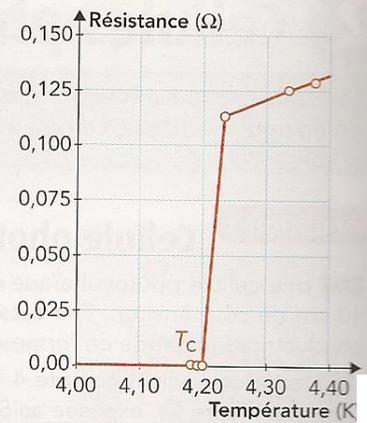
Des matériaux sans résistance électrique

Les électrons sont responsables de la circulation du courant électrique dans les matériaux conducteurs. Lors de leurs déplacements, les électrons subissent de nombreux chocs qui les ralentissent. On appelle résistance électrique la propriété d'un matériau à ralentir le passage du courant électrique. Cette résistance provoque un échauffement du matériau par effet Joule (grille-pain, ampoule électrique à filament, etc.).

En 1911, H. KAMERLINGH ONNES étudie la résistance électrique du mercure à très basse température. Il découvre qu'en dessous d'une certaine température, appelée température critique, T_C , la résistance du mercure s'annule (schéma ci-contre). Il nomme ce phénomène « supraconductivité ».

Pour confirmer la disparition totale de résistance, il initie un courant électrique dans un anneau d'étain rendu supraconducteur. Il observe effectivement que ce courant continue à circuler indéfiniment.

L'année 2011, centenaire de sa découverte, a été déclarée année mondiale de la supraconductivité.

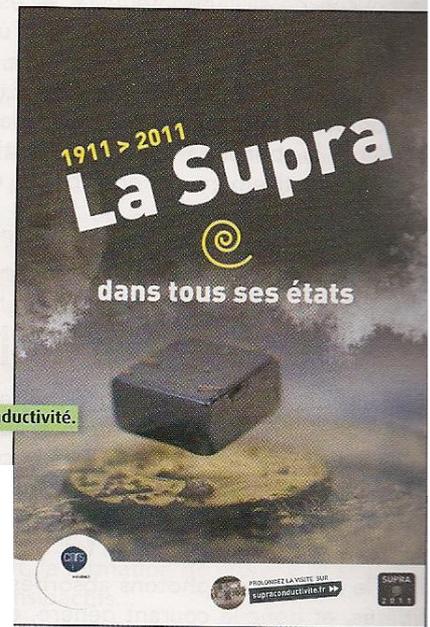


Résistance du mercure.

Le cube métallisé gris sur l'affiche ci-contre est un aimant, il crée autour de lui un champ magnétique qui traverse tout matériau non magnétique, comme la pastille circulaire située au-dessous de lui. À basse température ($T < T_C$), la pastille, généralement une céramique, devient supraconductrice. Elle expulse alors le champ magnétique vers l'extérieur ce qui crée une force sur l'aimant et le fait léviter : c'est l'effet Meissner. Cet effet est utilisé, entre autres, dans le fonctionnement d'un train japonais (voir p. 147).

D'après le site www.supraconductivite.fr

1911-2011, cent ans de supraconductivité.



Questions

1.a. En utilisant la théorie des bandes, expliquer la conductivité électrique élevée des métaux.

b. Qu'est ce qui différencie un semi-conducteur d'un isolant dans la théorie des bandes ?

2. Pourquoi un semi-conducteur constitué d'un monocristal de silicium a-t-il une conductivité quasi nulle ?

3.a. Les principaux semi conducteurs sont constitués de réseaux cristallins d'atomes de silicium, Si, ou de germanium, Ge. Ou sont situés ces deux éléments dans la classification périodique ? Justifier que le silicium peut s'engager dans quatre liaisons covalentes.

- b. Rechercher dans la classification, d'autres éléments que le bore ou le phosphore pouvant assurer un dopage de type p ou de type n.
4. A température ambiante, l'énergie d'agitation thermique est d'environ 25meV. Pourquoi, à température ambiante, un semi conducteur dopé peut-il conduire le courant électrique ?
5. Comment justifier que la résistance des métaux augmente lorsque la température croit ?
- 6.a. Exprimer, en degré Celsius, la valeur de la température critique T_c du mercure.
- b. Comment au début du 20^{ème} siècle Kamerlingh Onnes a-t-il pu atteindre un mercure a une température aussi basse ?
7. Comment varie la résistance du mercure avec la température pour $T < T_c$ et $T > T_c$?
8. Aujourd'hui, les appareils d'IRM ainsi qu'un train japonais à grande vitesse utilisent la supraconductivité. Expliquer pourquoi ?

2. Etude d'un semi-conducteur, la diode au silicium

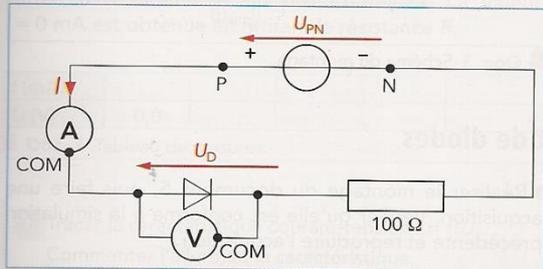
A Caractéristique d'une diode au silicium

► Une diode est un composant dont le symbole est :



► Réaliser le montage du **document 1**.

► Régler l'ampèremètre pour qu'il mesure l'intensité I en milliampère (mA), puis le voltmètre pour qu'il mesure la tension U_D aux bornes de la diode, en volt (V).



► 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. Porter ces valeurs dans un tableau. Les valeurs négatives de la tension U_{PN} sont obtenues en inversant les pôles du générateur.

► Tracer le graphe $I = f(U_D)$.

- 1 Décrire l'allure du graphe $I = f(U_D)$. Indiquer sur quelle partie de la caractéristique la diode :
 - a. conduit le courant électrique (diode passante) ;
 - b. bloque le courant électrique (diode bloquée).
- 2 Déterminer graphiquement la valeur de la tension aux bornes de la diode lorsqu'elle devient passante (appelée tension de seuil et notée U_S).
- 3 Choisir une valeur de U_{PN} pour laquelle la diode est passante. Inverser le sens de branchement de la diode. Qu'observe-t-on ?
- 4 La diode n'est pas un dipôle symétrique. Justifier.

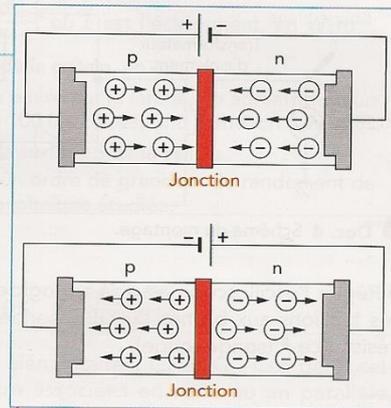
Doc. 1 Schématisation du montage.

B Fonctionnement interne d'une diode

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 (**doc. 2**).

Le semi-conducteur dopé n conduit le courant par « sauts d'électrons », les charges négatives sont schématisées par \ominus . Le semi-conducteur dopé p conduit le courant par « sauts de trous ». Les trous sont 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 inverses. 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.



Doc. 2 Déplacement des électrons et des trous.

Matériel nécessaire

Générateur de tension réglable 0/30V.

Deux multimètres (ampèremètre + voltmètre)

Fils de connexions longs et courts

Diode

Résistance 100 Ω

Platine support