

Titre : Application des semi-conducteurs à l'électronique et/ou l'optique

Présentée par : Charlie Kersuzan

Rapport écrit par : Martin Caelen

Correcteur : Martial Mazars

Date : 31/05/2021

Bibliographie	
Titre	Auteurs
Physique de l'état solide	Kittel
Physique des solides	Physique des solides
Physique des semi-conducteurs	Ngô
https://www.youtube.com/watch?v=4SlfaocMfdA	Vidéo sur jonction PN
https://www.youtube.com/watch?v=BH9LI973H8w	Vidéo sur LED

Plan détaillé

(indiquer parties, sous-parties, 1 ou 2 phrases d'explications par sous-partie, et références)

Niveau choisi pour la leçon : Licence

Pré-requis : Physique statistique, distribution de Fermi-Dirac, caractéristique d'une photodiodes

Introduction:

On va étudier l'application des semi-conducteurs aux domaines de l'électronique et de l'optique. Tout comprendre aux semi-conducteurs relèverait du niveau master, nous allons donc chercher à comprendre les grandes idées sur ce sujet sans rentrer dans les détails

1'15"

I – Propriétés des semi-conducteurs

1 – Bandes de valence et de conduction, énergie de gap

Diagramme d'énergie : présente la bande de valence (dernière bande remplie) et la bande de conduction (celle juste au-dessus)

Les électrons ne peuvent pas passer d'une bande à l'autre facilement : isolant ou semi-conducteur selon l'énergie de gap (énergie qui sépare la BV et la BC).

Pour un semi-conducteur : $E_g < 5 \text{ eV}$. Pour un isolant : $E_g > 5 \text{ eV}$

Pour des métaux, la BV ne serait pas remplie entièrement d'électrons

Pour un semi-conducteur, à $T = 0 \text{ K}$: tous les électrons sont dans la bande de valence.

Pour $T > 0 \text{ K}$, certains électrons passent dans la bande de conduction.

On définit la densité de porteurs : n_e : nombre d'électrons présents dans la bande de conduction.

En passant dans la bande de conduction, il laisse un "vide" d'électron dans la bande de valence, on parle de trou d'électron. La densité de porteurs est donc aussi égale à n_h (h pour "hole") : le nombre de trous dans la bande de valence.

En pratique : $n_e = N_e \exp((E_f - E_c)/kT)$, et $n_h = N_e \exp(-(E_c - E_v)/kT)$

E_f est l'énergie de Fermi.

8'00"

2 – Dopage

Si : 4 e- de valences

Tous les 1 000 000 d'atomes on met un atome d'As : 5 e- de valence.

Même structure de bandes car très peu d'impuretés, mais on augmente le nombre d'électrons qui circulent dans le matériau, donc on modifie l'énergie de Fermi.

Impuretés apportent des électrons en excès : E_f augmente, dopage n : on ajoute des électrons
Impuretés apportent moins d'électrons : E_f diminue, dopage p : on ajoute des trous

10'55"

II – La jonction PN

1 – Présentation du phénomène

On vient accoler deux matériaux dopé p et n (dans les fois c'est un peu plus techniquement compliqué).

Explication de ce qui se passe microscopiquement : région de déplétion, avec création d'un champ électrique qui s'oppose à la recombinaison des trous et électrons.

15'40"

2 – Polarisation de la jonction

On branche aux bornes de la jonction PN un générateur idéal de tension, qui impose une différence de potentiel V_a . Si $V_a > 0$: $E_f - E_v = e(V_0 - V_a)$ diminue. Et comme $n_e = N_e \exp(-(E_f - E_v)/kT)$, réduire $E_f - E_v$ augmente la conductivité de la jonction PN.

$$V_0 = kT/e \ln(N_a N_d / n_i^2)$$

Si $V_a > 0$: on augmente la barrière de potentiel entre n et p, le courant peut circuler : diode passante.
Si $V_a < 0$: le courant est quasi-nul : diode bloquée.

On montre la caractéristique d'une diode, à la fois en diapo et à la fois expérimentalement.

22'40"

III – Applications

1 – Application à la détection de lumière : la photodiode

$V_a < 0$: polarisation en inverse.

Quand on éclaire la photodiode, le courant de la diode bloquée augmente en norme.

Avec une photodiode éclairée, des paires électrons trous sont créées, et le champ électrique existant dans la photodiode va séparer l'électron et le trou formé, ce qui crée un courant électrique.

27'30"

2 – Application à l'émission de lumière : la DEL (ou LED)

$V_a > 0$: jonction en polarisation directe

On réduit l'écart entre là où sont les trous et les électrons sont : ils vont se rapprocher l'un de l'autre, se recombiner, et provoquer l'émission d'un photon d'énergie E_g .

On peut même faire des laser avec ces effets.

31'15"

3 – Application à l'électronique : le redresseur

Quand on fait passer une tension sinusoïdale dans une diode, on observe qu'elle ne laisse passer que les courants négatifs (ou positifs, selon le branchement).

En utilisant plusieurs photodiodes astucieusement, on peut transformer un signal sinusoïdal soit redressé (on obtient la valeur absolue du signal), et en ajoutant des capacités qui ralentissent la rechute du signal, on peut transformer un signal sinusoïdal en signal continu.

36'20"

Conclusion : D'autres choses plus compliquées existent : jonctions PNP ou NPN, qui permettent de faire des amplificateurs de puissance. On peut aussi utiliser les semi-conducteur comme thermistances.

37'30"

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

(l'étudiant liste les questions posées, ainsi que les réponses données par l'enseignant. Si certaines réponses manquent, l'enseignant pourra compléter le document)

- **Préciser le niveau attendu.** L3, mais on aurait même pu faire ça un peu plus tôt.
- **Quelle était l'abscisse des diagrammes d'énergie tracés au tableau ?** Il n'en avait pas vraiment. Mais on aurait pu le tracer en fonction du vecteur d'onde k .
- **Expliquer la théorie des bandes en physique du solide.** ~~Bande interdite à cause de la périodicité du cristal.~~ *Résultent des niveaux électroniques discrets combinés sur un ensemble de N atomes n'étant pas infiniment éloignés les uns des autres (recouvrement des orbitales)*
- **Pourquoi on parle de bande de valence et de bande de conduction ? Pourquoi les électrons de la bande de valence ne conduisent pas ?** Pour créer de la conduction, il faut dissymétriser le remplissage des bandes, ce qui n'est possible que si une bande n'est pas entièrement remplie.
- **Qu'est-ce que la température de Fermi ?** Définie par $kT_f = E_f$
- **Ordre de grandeur d'une température de Fermi ?** $T_f = 10^4$ K pour les métaux.
- **Dessiner la distribution de Fermi-Dirac.**
- **Qu'entend-on par un semi-conducteur intrinsèque ?** Il n'est pas dopé.
- **À quoi peut servir semi-conducteur intrinsèque ?** Filtre luminescent. Thermistance. Sonde à effet Hall. Photorésistance.
- **Des exemples de valeur de E_g ?** Pour le Germanium : 0,7 eV.
- **Autre nom pour la couche de déplétion ?** Double-couche.
- **Qu'est-ce que le courant inverse d'une diode ?** C'est le courant traversant la diode quand celle-ci est polarisée en inverse.
- **Par quelle fonction modéliser la caractéristique de la photodiode ?** Une exponentielle.
- **À quoi correspond le cadran générateur de la caractéristique de la photodiode ?** Régime de fonctionnement d'une photopile (ou cellule photovoltaïque).
- **Pourquoi la caractéristique de la photodiode était hystérétique dans l'expérience ?** En diminuant la fréquence ce phénomène disparaît, c'était donc dû à des effets capacitifs.
- **Pourquoi observe-t-on un petit décalage en tension ?** Il est dû à la tension seuil de la caractéristique de la diode, qui correspond au V_0 de la leçon, de l'ordre de 0,7V.
- **Comment réalise-t-on le redressement double-alternance ?** *Pont de diodes (cf. conversion alternative-continue).*

Commentaires lors de la correction de la leçon

(l'étudiant note les commentaires relatifs au contenu de la leçon : niveau, sujets abordés, enchaînement, réponses aux questions, etc. L'enseignant relit, et rectifie si besoin)

- Les prérequis demandés sont de niveau fin de L3 voire M1, c'est un peu limite pour une leçon d'agreg, d'autant qu'ils n'étaient pas vraiment nécessaires à la leçon présentée.
- Il aurait été mieux avisé de tracer en fonction du vecteur d'onde le diagramme d'énergie, pour expliquer la conduction par dissymétrie de la distribution en vecteur d'onde.

- L'énergie de Fermi elle bouge pas quand on ajoute des impuretés.
- On pouvait dire en introduction qu'à chaque fois, dans chaque application des semi-conducteurs, l'enjeu est de faire passer des électrons d'une bande à l'autre. En se concentrant sur chaque façon de s'y prendre, on peut ainsi construire toute une gamme de capteurs.
- On pourra retrouver davantage de détails sur des exemples d'applications des semi-conducteurs dans le livre sur les capteurs de Asch.

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.) :

Le titre de cette leçon est très vaste et un traitement exhaustif de toutes les applications des semi-conducteurs

à l'optique et/ou l'électronique n'est pas possible dans les 40 mins d'exposé.

Il semble plus approprié de décrire les propriétés d'un semi-conducteur et les différents processus permettant de modifier la conductivité du milieu, qui conduisent à toutes les applications possibles.

La seconde difficulté est de placer l'exposé à un niveau précis.

Pour des applications simples comme le fonctionnement d'une diode, l'exposé peut-être fait à un niveau L1-L2.

Pour des descriptions plus détaillées faisant appel à la statistique de Fermi-Dirac, l'exposé se situe à un niveau L3-M1.

Il me semble possible de ne pas restreindre l'ensemble de l'exposé à un seul niveau, mais alors il faut clairement dire, durant l'exposé de 40 mins, à quel niveau on place la sous-partie qui suit.

Ce qui rajoute une difficulté supplémentaire dans la préparation d'une telle leçon.

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates :

En fondamentales, incontournables:

- la différence entre conducteurs, isolant et semi-conducteurs ; des notions sur les bandes de valence, de conduction et interdite ; le rôle du dopage.

En fondamentale aussi, mais plus délicate :

- l'utilisation de la statistique de Fermi-Dirac

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) :

La variation de la caractéristique d'un photodiode avec l'intensité lumineuse est une expérience facile et très bien adaptée pour cette leçon.

Bibliographie conseillée :