

Table des matières

| | |
|--|----------|
| 1 Objectifs et messages forts de la LP (aspect disciplinaire) | 1 |
| 2 Prérequis | 1 |
| 3 Introduction générale de la leçon | 1 |
| 4 Un modèle classique : la conduction par Drude | 2 |
| 4.1 Hypothèses | 2 |
| 4.2 De la structure de bandes à la nature d'un matériau. | 2 |
| 5 Ouvertures possibles, prolongements et conclusion de la leçon | 2 |
| 6 Expériences illustratives et exploitation pédagogique | 2 |
| 7 Questions posées à l'issue de la présentation | 2 |
| 8 Bibliographie pour construire la leçon | 4 |

1 Objectifs et messages forts de la LP (aspect disciplinaire)

- ▷ comprendre les hypothèses du modèle de Drude ;
- ▷ savoir retrouver la loi d'Ohm locale grâce au modèle de Drude ;
- ▷ comprendre l'intérêt d'un montage quatre fils pour une mesure de résistance et savoir relier la résistance mesurée aux autres grandeurs du modèle ;
- ▷ comprendre l'origine physique de la structure de bandes ;
- ▷ savoir déterminer, à partir d'un diagramme de bandes, la nature d'un matériau.

2 Prérequis

- ▷ électrocinétique ;
- ▷ modèle de Drude (L2) ;
- ▷ décomposition en série de Fourier ;
- ▷ équation de Schrödinger, résolution pour un électron libre ;
- ▷ théorie des perturbations stationnaires, dégénérescence ;
- ▷ notions de matière condensée (réseau de Bravais, réseau réciproque, conditions aux limites périodiques, théorème de Bloch) ;
- ▷ énergie de Fermi ;
- ▷ statistique de Fermi-Dirac ;
- ▷ méthode CLAO, diagrammes d'orbitales moléculaires.

3 Introduction générale de la leçon

- ▷ Accroche : crise des semi-conducteurs

[†]arnaud.le_diffon@ens-paris-saclay.fr

4 Un modèle classique : la conduction par Drude

4.1 Hypothèses

- ▶ Loi d'Ohm locale
- ▶ Résistance électrique

Transition didactique : Le modèle de Drude nous a permis de distinguer les matériaux par leur conductivité électrique. Toutefois, ce modèle ne permet pas de mettre en évidence ce qui caractérise microscopiquement un semi-conducteur ou un isolant. Nous allons pour cela devoir étudier ce que l'on appelle la structure de bandes des matériaux.

4.2 De la structure de bandes à la nature d'un matériau

- ▶ Position du problème
- ▶ Relation centrale
- ▶ Levée de dégénérescence et bande interdite
- ▶ Métal, semi-conducteur, isolant

5 Ouvertures possibles, prolongements et conclusion de la leçon

- ▷ Ouverture sur l'étude des semiconducteurs, qui sont très utilisés en électronique.

6 Expériences illustratives et exploitation pédagogique

- ▷ mesure de la résistance d'un solénoïde en cuivre (montage quatre fils) pour relier une grandeur microscopique (temps caractéristique des collisions τ à une grandeur macroscopique mesurable (résistance).

7 Questions posées à l'issue de la présentation

- ▷ Qu'est-ce que le dopage d'un semiconducteur ? *Présence d'impuretés dans le cristal, typiquement bore ou phosphore dans un cristal de silicium. Cela enrichit ou appauvrit le semiconducteur en électrons.*
- ▷ En quoi cela se manifeste sur le diagramme de bandes ? *Dopé N : l'énergie de Fermi est plus proche du bas de la bande de conduction ; dopé P proche du haut de la bande de valance.*
- ▷ Qu'est-ce que la masse effective ? $[\frac{1}{m^*}]_{i,j} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E}{\partial k_i \partial k_j}$; *mesure la courbure de la bande.*
- ▷ En quoi le graphène est-il intéressant ? *Masse effective nulle.*
- ▷ Différence de masse effective entre les électrons et les trous ? *Signe de m^* .*
- ▷ Intérêt du montage quatre fils pour la mesure de la résistance ? *S'affranchir de la résistance des fils qui n'est pas négligeable. L'impédance d'entrée du multimètre côté ohmmètre est supposée infini donc pas de courant dans ces fils.*
- ▷ Comportement de τ en fonction de T ? *J'ai plutôt en tête un graphe de $\rho(T)$, résistivité nulle en dessous d'une température critique (supraconducteur) et affine en T au delà de cette température.*
- ▷ Quelles hypothèses du modèle de Drude sont discutables ? *Approximation des électrons libres, collisions liées en fait aux phonons.*
- ▷ Qu'y a-t-il dans τ ? *Libre parcours moyen, mais c'est en fait un peu une boîte noire. On ne sait pas distinguer ce qui dans τ est lié à la collisions des électrons entre eux, des électrons avec les ions ou avec les phonons*

- ▷ D'où vient l'augmentation de la résistivité avec la température? *Interaction avec les phonons, on gèle les phonons peu à peu avec la température.*
- ▷ Métal le plus conducteur? *Argent*
- ▷ Qui a inventé le transistor? *Bardeen, Shockley, Brattain. John Bardeen a eu deux fois le Prix Nobel de physique (1956 et 1972)! Travaux sur les semiconducteurs et les supraconducteurs.*
- ▷ Quelles sont les deux grandes familles de transistors? *Transistor bipolaire (NPN ou PNP), contrôlé en courant; transistor à effet de champ, contrôlé en tension.*
- ▷ La leçon n'est-elle pas plutôt de niveau M1? *Elle est adaptée à un niveau M1 mais tout à fait faisable en L3 à condition que les élèves aient des connaissances en physique du solide. Le calcul qui permet d'aboutir à une bande interdite est une jolie application de la théorie des perturbations stationnaires dans le cas de dégénérescence qui est de niveau L3.*
- ▷ Qu'est-ce qui explique la forte demande en semi-conducteurs?
- ▷ Propriétés intéressantes pour l'électronique, jonctions PN dans les transistors, le nombre de particules chargées par unité de volume est plus faible que celle d'un métal ce qui est intéressant pour l'effet Hall.
- ▷ Pourquoi n'utilise-t-on pas de métaux pour réaliser des cellules photovoltaïques? *Temps de relaxation trop court donc pas utilisable.*
- ▷ Quid des autres grandeurs utilisées dans le calcul de τ ? *n peut être mesuré par la méthode ARPES.*
- ▷ Qu'est-ce que la loi de Wiedemann-Franz? Quel est son domaine de validité? *Rapport $\frac{\kappa}{\sigma T}$ constant pour un liquide de Fermi, T très petite devant T_F .*
- ▷ Pourquoi est-ce valable à température ambiante pour un métal? *Estimation de $T_F = \frac{\varepsilon_F}{k_B}$ de l'ordre de $10^4 K$ donc grand devant $300 K$.*
- ▷ Qu'est-ce qui ne fonctionne plus au delà de T_F ? *Encore une histoire de phonons.*
- ▷ Qu'est-ce que l'énergie de Fermi? *Énergie du dernier état occupé à $T = 0 K$.*
- ▷ La discussion sur l'occupation des bandes se fait-elle à $T = 0 K$? *Attention, c'est le potentiel chimique et non l'énergie de Fermi qui intervient dans la statistique de Fermi-Dirac, seulement les deux coïncident à $T = 0 K$. En réalité c'est OK en première approximation, comportement en $(\frac{T}{T_F})^2$.*
- ▷ Expression de la statistique de Fermi-Dirac? Représentation graphique?
- ▷ Démonstration de l'obtention d'une force de frottement fluide avec les hypothèses de Drude?
- ▷ Quelles grandeurs sont modifiées si l'on prend en compte l'interaction des électrons entre eux? *Masse effective et τ .*
- ▷ Peut-on appliquer le modèle de Drude à plusieurs types de particules en même temps? *On peut faire une analogie avec la loi de Kohlrausch dans une solution électrolytique, linéarité de la conductivité.*
- ▷ Qu'est-ce que la supraconductivité? Quelle est son origine? *Résistivité nulle en dessous d'une température critique, effet Meissner : le supra repousse les lignes de champ magnétique, il ne peut pas s'aimanter. Origine : Cooper, paires d'électrons et phonons (théorie BCS).*
- ▷ Qu'est-ce que l'effet Hall? L'effet Hall quantique? *Effet Hall quantique : quantification de la tension*

Hall, on peut l'observer à la limite de rupture d'un matériau à l'oscillo apparemment.

- ▷ Quel est le comportement de la conductivité à fréquence finie ? $\frac{\sigma_0}{1+j\omega\tau}$
- ▷ Puissance dissipée ?
- ▷ Conductivité optique ? *Excitation des plasmons avec un laser.*
- ▷ Quelle hypothèse n'est plus valable si on attaque le métal avec des fréquences optiques ? *Électronneutralité.*
- ▷ Discussion sur les domaines avec ARQS, électronneutralité (voir cours d'Arnaud).
- ▷ Effets thermoélectriques ? *Peltier, Seebeck, couplage entre les gradients de température et de potentiel, on peut écrire une matrice 2x2 avec des termes diagonaux qui rendent compte du couplage.*

8 Bibliographie pour construire la leçon

- ▷ *Introduction to Solid State Physics*, Kittel
- ▷ *Physique des solides*, Ashcroft & Mermin
- ▷ *Électromagnétisme* (Chapitre IX), Mauras

- BONNE PRÉPARATION -