Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge

SEMICONDUCTEURS

2024-2025

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.

Table des matières

1 [1P] Rappels **3**

2 [1P] Variation de la conductivité d'un semiconducteur avec la température **4**

3 Densité et mobilité des porteurs **4**
3.1 [1P] Propriétés de transport à température ambiante 5
3.2 [AP] Influence de la température 7

4 Propriétés optiques **8**
4.1 Absorption fondamentale d'un semiconducteur 8
4.2 Caractérisation d'une DEL blanche 10
4.3 [2P] Diodes électroluminescentes (DEL, ou LED en anglais) 11
4.4 Photoconductivité : création de porteurs par un rayonnement lumineux 11

Bibliographie :

- Kittel *Introduction à la physique de l'état solide*
- Asch *Les capteurs en instrumentation industrielle*
- Vapaille, Castagné *Dispositifs et circuits intégrés semiconducteurs*
- Sze *Physics of semiconductor devices*, chapitre 1
- Ashcroft, Mermin *Solid state physics* (en français : *Physique des solides*), chapitre 28
- Asch et coll., *Les capteurs en instrumentation industrielle*, 7e édition, Dunod

Les semiconducteurs sont des matériaux dont la conductivité, intermédiaire entre celles des isolants et des conducteurs, varie sur plusieurs ordres de grandeur sous l'effet de :

- la température,
- l'éclairement,
- la présence d'impuretés (dopage).

L'étude de la conductivité en fonction de la température et celle de l'absorption optique permettent d'accéder à la grandeur physique essentielle de ces matériaux, la largeur de bande interdite (en anglais "band gap"). L'effet Hall permet de mettre en évidence l'existence de deux types de porteurs (que l'on ne peut pas expliquer par un modèle classique, cf Drude) et de mesurer leur densité.

1 [1P] Rappels

Rappel sur les ordres de grandeur :

- gap E_g des semiconducteurs usuels à 300K (Kittel, 7ième ed. p183) :

Ge : 0,67 eV — Si : 1,11 eV — GaAs : 1,43 eV — GaP : 2,25 eV — CdS : 2,42 eV

- à la température ambiante, kT = 25 meV
- énergie d'ionisation des impuretés (donneurs et accepteurs) : de l'ordre de 10 meV

À température nulle, la bande de conduction est vide d'électrons, la bande de valence en est pleine, et les impuretés dopantes sont dans leur état de charge neutre.

Aux basses températures, les donneurs libèrent leur électron dans la bande de conduction et les accepteurs capturent un électron provenant de la bande de valence (on dit qu'ils libèrent un trou dans la bande de valence). Lorsque toutes les impuretés sont ionisées, la densité de porteurs libres ne dépend plus de la température. Les porteurs majoritaires sont les électrons de conduction si les donneurs sont prépondérants (matériau de type n), et les trous de la bande de valence dans le cas contraire (matériau de type p).

À plus haute température, les paires électron-trou créées directement par excitation thermique d'un électron de la bande de valence dans la bande de conduction deviennent prépondérantes. Le semiconducteur est alors dans un régime dit intrinsèque (par opposition à la situation précédente, dite extrinsèque, où les propriétés sont gouvernées par les impuretés). Le niveau de Fermi "intrinsèque" E_{Fi} (c'est-à-dire celui du cristal parfait sans impureté) se situe vers le milieu de la bande interdite. Les densités intrinsèques des électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence sont dans ces conditions données par la statistique de Boltzmann :

$$n_i = N_c e^{-(E_c - E_{F_i})/kT} \quad \text{et} \quad p_i = N_v e^{+(E_v - E_{F_i})/kT} \tag{1}$$

où N_c et N_v sont des coefficients dépendant de la température et des "masses effectives" des électrons et des trous (voir Kittel, chapitre 8). Du fait de la neutralité électrique du semiconducteur, les densités intrinsèques n_i et p_i sont égales, et on a :

$$n_i = p_i = (n_i p_i)^{1/2} = (N_c N_v)^{1/2} e^{-(E_c - E_v)/2kT} = (N_c N_v)^{1/2} e^{-E_g/2kT}. \tag{2}$$

La variation en température de la conductivité s'écrit $\sigma = n(T)\,|q|\,\mu(T)$, où q est la charge des porteurs et μ leur mobilité, définie par $\vec{v} = \mu\,\vec{E}$ (avec $\vec{v}$ la vitesse des porteurs et $\vec{E}$ le champ électrique). À des énergies supérieures au gap, cette variation est dominé par le terme en exponentiel décrivant la création de paires électrons-trous, les autres facteurs ayant une variation plus lente en température.

Lorsque la température n'influe pas sur le nombre de porteurs (au niveau du plateau extrinsèque), l'augmentation de celle-ci diminue la mobilité des électrons, ce qui diminue la conductivité à nombre de porteurs libres fixé. Cette effet est cependant petit par rapport aux modifications dues à l'augmentation du nombre de porteurs expliquées ci-dessus.

Le comportement attendu pour la résistivité $r = 1/\sigma$ est donc essentiellement le suivant :

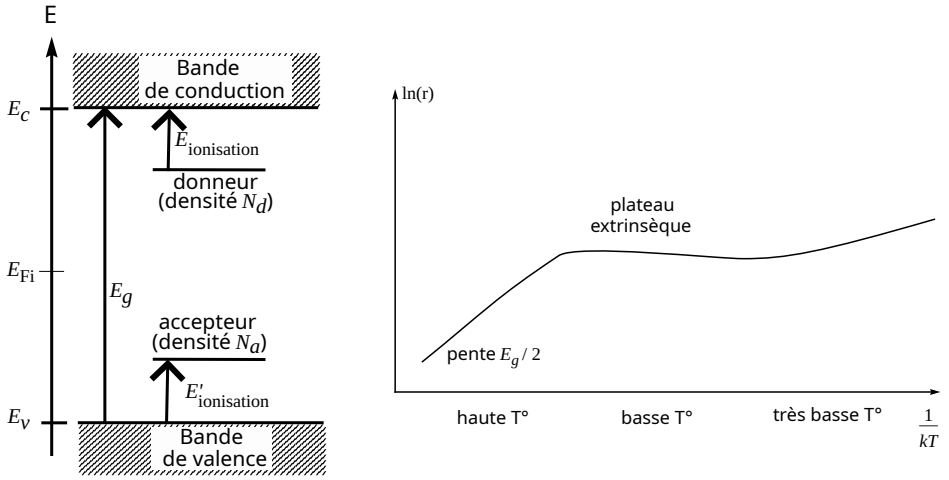

FIGURE 1 –

2 [1P] Variation de la conductivité d'un semiconducteur avec la température

L'observation, à température ordinaire, de la conduction intrinsèque requiert un semiconducteur non dopé. On propose ici d'étudier un barreau de Germanium non dopé [1].

Une résistance chauffante est accolée à l'échantillon. Elle doit être alimentée sous 6 V et 5 A maximum. On utilisera de préférence une alimentation variable : il est conseillé de procéder à un chauffage lent de l'échantillon en appliquant au départ une tension de 2 V, puis de 4 V et enfin de 6 V.

La température est donnée par un thermocouple de type T (cuivre-constantan), dont la soudure est collée à l'échantillon. Sa sensibilité est de 40 μV/K . Utiliser pour la lecture de la f.e.m. du thermocouple un voltmètre de sensibilité appropriée (affichant 0,01 mV). **Attention de ne pas dépasser 125°C, soit une f.e.m. de 5 mV pour le thermocouple !** [5 mV=40 µV/K × (125°C)]. Il y a destruction complète à 150°C : en pratique, il est plus prudent de rester sous les 4,5 mV.

À l'aide d'un ohmmètre, mesurer la variation de la résistance R avec la température T. Pourquoi est-il préférable de faire les mesures lors du refroidissement ? Déduire du diagramme $\ln R = f(1/T)$ la largeur de la bande interdite du germanium.

Remarque : On pourra aussi étudier une thermistance du commerce. La plage d'utilisation est limitée à -25°C,+125°C. Mesurer à l'ohmmètre sa résistance pour différentes températures dans ce domaine, en la trempant dans un ballon d'eau à différentes températures. Il est nécessaire d'agiter pour homogénéiser la température. Construire la courbe $\ln(R) = f(1/T)$ et la comparer à la notice du constructeur (notice 5).

3 Densité et mobilité des porteurs

La mesure de la résistivité d'un barreau de semiconducteur et la mesure de l'effet Hall associé permettent le calcul de la densité des porteurs et de leur mobilité.

On dispose de deux échantillons de Germanium dopé, de résistivité ρ de l'ordre de quelques Ω.cm (attention aux unités non SI !), l'un de type n, l'autre de type p, de dimensions $L = 20$ mm, $a = 10$ mm, $b = 1$ mm. On utilisera ces échantillons pour déterminer, à température ambiante, le signe des porteurs et leur concentration. L'étude en

1. En pratique, un semiconducteur a toujours quelques impuretés lors de sa fabrication, mais leur densité est faible comparée aux densités typiques de dopage "volontaire".

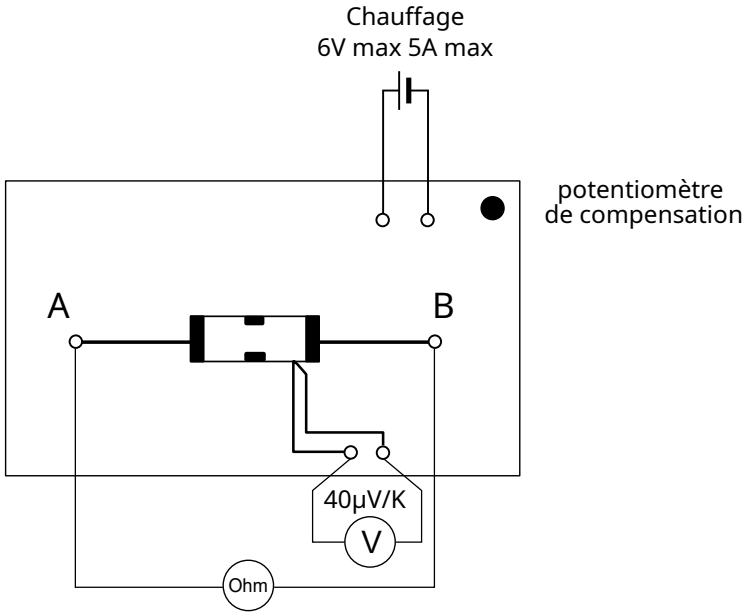

FIGURE 2 –

température qui suit, plus délicate, n'est pas conseillée car elle ne permet pas d'atteindre le régime intrinsèque. Pour l'étude de ce régime et la mesure de la largeur de bande interdite, se reporter au paragraphe précédent.

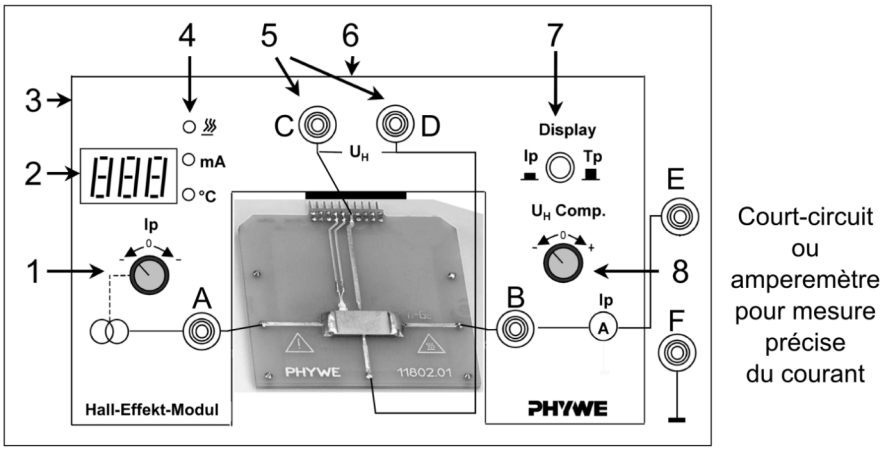

FIGURE 3 –

La plaquette doit être branchée sur une alimentation externe 12V alternative, prévu spécialement pour cette plaquette (ENSP 4273). Le contrôle du courant se fait par la commande 1. Une lecture du courant est possible sur l'affichage 2, le bouton 7 étant enfoncé. Cette mesure n'étant pas très précise, on préférera mettre un ampèremètre continu entre E et F. En l'absence de cet ampèremètre, il est nécessaire de relier ces deux points de mesure pour que le courant puisse circuler. Pour mesurer la résistance de l'échantillon, on utilisera les points de mesures A et B. Pour mesurer la tension Hall, on utilisera les points de mesures C et D. Il est possible d'annuler la tension entre C et D en l'absence de champ magnétique à l'aide de la commande 8, pour compenser toute éventuelle chute Ohmique.

3.1 [1P] Propriétés de transport à température ambiante

Résistivité Mesurer la résistance de l'échantillon. Pour cela, ne pas utiliser d'ohm-mètre mais un courant d'environ 5 mA pour éviter l'auto-échauffement (cf notice 162). De la mesure de tension aux bornes de AB, déduire la résistivité du matériau à température ambiante. Comparer à la valeur nominale donnée par le fabricant.

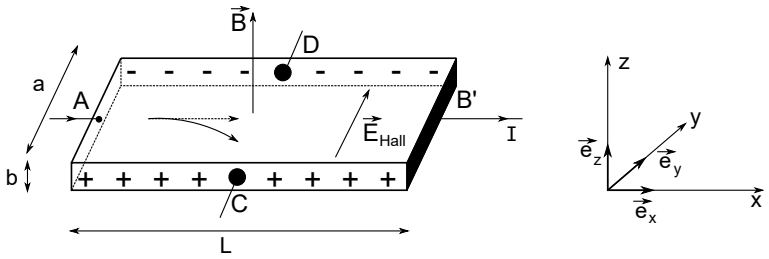

FIGURE 4 –

Effet Hall Le dessin représente le cas $q > 0$.

Lorsque le barreau est plongé dans un champ magnétique $\vec{B} \parallel Oz$ ($\vec{B} = B\vec{e}_z$) et parcouru par un courant I longitudinal parallèle à Ox, il apparaît un champ électrique transversal parallèle à Oy, dit *champ de Hall*.

Soit n la densité de porteurs, q leur charge (algébrique), et $\vec{v}$ leur vitesse moyenne définie par la densité de courant :

$$\vec{j} = \frac{I}{ab}\vec{e}_x = nq\vec{v}. \tag{3}$$

Chaque porteur est soumis à la force de Lorentz $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$.

Cette force tend à dévier les porteurs qui s'accumulent sur la face latérale ($\perp Oy$) du barreau : il se crée donc un champ électrique $\vec{E}_H$ parallèle à Oy. En régime permanent, les trajectoires des porteurs sont parallèles à Ox et les deux forces se compensent exactement :

$$q\vec{v} \wedge \vec{B} + q\vec{E}_H = \vec{0}, \tag{4}$$

soit :

$$\vec{E}_H = \frac{-IB}{abnq}\vec{e}_x \wedge \vec{e}_z = \frac{IB}{abnq}\vec{e}_y. \tag{5}$$

D'où la tension de Hall :

$$V_H = V_C - V_D = \frac{IB}{bnq}\,. \tag{6}$$

On a ainsi accès à la fois au type de porteurs (signe de q) et à leur concentration.

L'expression simple précédente n'est valable que si un seul type de porteurs contribue à la conductivité, ce que nous avons supposé depuis le début.

On notera que plus la concentration des porteurs est élevée plus l'effet Hall est petit. L'effet Hall existe aussi dans les métaux mais y est souvent difficilement mesurable car n est trop élevée. Par contre dans les semiconducteurs, où n est plus faible, V_H est facilement mesurable.

Application de l'effet Hall dans un semiconducteur : le teslamètre.

Réalisation de l'expérience Mesurer $V_C - V_D$ avec un voltmètre. Comme il est difficile de placer les deux contacts C et D exactement l'un en face de l'autre, la d.d.p. $V_C - V_D$ comporte une partie de chute ohmique. Annuler celle-ci au préalable en l'absence de champ magnétique en agissant sur le potentiomètre de compensation.

Placer ensuite le barreau de germanium dans l'entrefer d'un électroaimant ($\vec{B} \parallel Oz$). Ne laisser l'électroaimant branché que pendant les quelques secondes nécessaires à la mesure, sinon il chauffe la plaquette et perturbe fortement la mesure. Mesurer le champ magnétique B et la différence de potentiel $V_C - V_D$. Vérifier que $V_H\left(\vec{B}\right) = -V_H\left(-\vec{B}\right)$. En [2P], on peut éventuellement montrer la proportionnalité de V_H à B.

Vérifier que la tension de Hall s'inverse lorsqu'on passe d'un échantillon de type n à un échantillon de type p.

Déduire du signe de la tension de Hall la nature des porteurs libres, ainsi que leur concentration :

$$n = \frac{IB}{qbV_H}. \tag{7}$$

Quelle est la concentration relative des impuretés dopantes par rapport aux atomes du cristal, sachant que chaque atome dopant fournit un porteur ?

En combinant les mesures d'effet Hall et de résistivité, déterminer la mobilité μ des porteurs. On pourra vérifier, à l'aide des figures fournies dans la notice, si ces différentes valeurs sont cohérentes.

3.2 [AP] Influence de la température

Remarque importante : actuellement, les mesures ci-dessous ne peuvent être réalisées qu'avec l'ancienne plaquette (Ge dopé p). Le système de chauffage des nouvelles plaquettes a en effet été volontairement désactivé, afin d'augmenter leur durée de vie...).

Dans un premier temps, **de manière analogue à II)**, on étudie la dépendance en température de la résistivité d'une semiconducteur mais cette fois **dopé**. En pratique, il s'agit du même protocole que précédemment.

Une résistance chauffante est accolée à l'échantillon. Elle doit être alimentée sous 6 V et 5 A maximum. On utilisera de préférence une alimentation variable (par exemple 10 V / 5 A continue), ce qui permet de réduire, si besoin est, la vitesse de chauffe.

La température est donnée par un thermocouple de type K, dont une soudure est collée à l'échantillon, l'autre étant à la température ambiante. Sa sensibilité est de 40 μV/K . Utiliser pour la lecture de la f.e.m. du thermocouple un voltmètre de sensibilité appropriée (affichant 0,01 mV).

La température monte de façon régulière. En jouant sur la tension d'alimentation, cette montée peut être rendue plus ou moins rapide. Les mesures sont prises au vol. On peut également prendre les mesures après arrêt du chauffage, lors du refroidissement de l'échantillon (protocole conseillé, comme dans le cas de l'échantillon intrinsèque). **Attention de ne pas dépasser 150 °C, soit une f.e.m. de 5 mV pour le thermocouple !** [5 mV=40 µV/K x (150 °C-25 °C)]

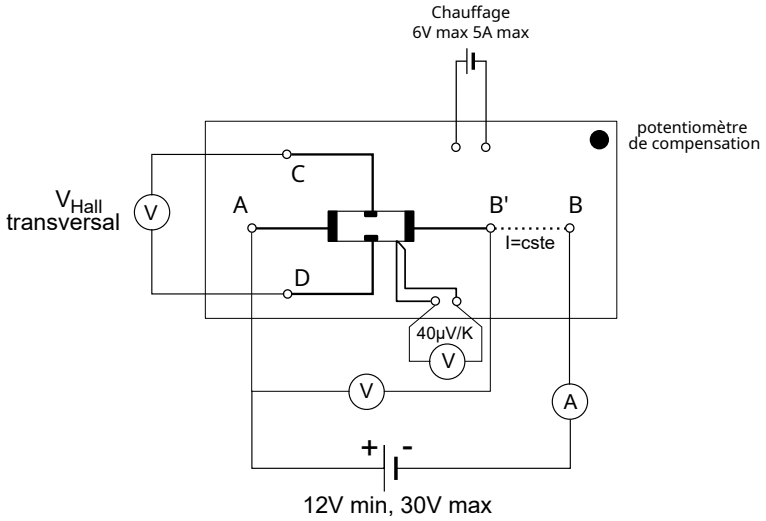

FIGURE 5 –

Variation de la résistance avec la température Mesurer la d.d.p. longitudinale $V_{AB'}$ en fonction de T.

Observer que la résistance $R(T)$ commence par croître légèrement avec T. C'est le *plateau extrinsèque* : dans ce domaine de température, le nombre de porteurs reste essentiellement constant, égal au nombre d'impuretés dopantes. C'est la décroissance de la mobilité avec l'augmentation de température qui est observée.

On observe ensuite que la résistance $R(T)$ décroît fortement à haute température. Ceci traduit l'apparition de porteurs libres thermiquement activés directement de la bande de valence. Sous l'effet de l'agitation thermique, des électrons de la bande de valence franchissent la bande interdite et passent dans la bande de conduction. Ces électrons, ainsi que les trous laissés derrière eux dans la bande de valence, participent à la conduction.

Dépendance en température de l'effet Hall Mesurer la tension de Hall de l'échantillon **de type p**, de 300 K à 425 K. Remarquer l'existence de trois régimes :

- un plateau aux basses températures : c'est le plateau extrinsèque discuté ci-dessus. Le nombre de trous est constant, égal au nombre d'accepteurs N_A.
- puis une forte décroissance pour des températures plus élevées : c'est le début de l'activation thermique des paires électron-trou. Dans ce domaine, les trous imposent le signe de l'effet Hall car ils sont encore en concentration plus forte que les électrons.
- enfin une inversion du signe de la tension de Hall. A haute température, les concentrations d'électrons et de trous sont élevées et pratiquement égales. Comme les électrons ont, dans le germanium, une mobilité plus élevée que celle des trous, ce sont eux qui dominent les propriétés de transport, et la tension de Hall change de signe.

On peut évaluer grossièrement la température d'inversion en disant que la tension de Hall s'annule lorsque la concentration d'électrons thermiquement excités à travers la bande interdite devient égale à la concentration de trous fournis par les accepteurs : $n_i(T) = N_A$.

Déterminer ainsi la température d'inversion avec l'abaque donné dans la notice. Comparer à la valeur obtenue expérimentalement.

Remarque :

Il n'y a évidemment pas d'inversion de signe pour l'échantillon de type n. Signalons que ni avec l'échantillon de type p ni avec celui de type n, on ne se trouve dans la région complètement intrinsèque pour le domaine de température accessible dans cette expérience ($T_{\max} = 425$ K). Il n'est donc pas possible de remonter à la valeur du gap par ces mesures.

4 Propriétés optiques

Retrouver la relation numérique liant la longueur d'onde en µm à l'énergie en eV d'un photon. Cette relation servira dans tout ce qui suit.

4.1 Absorption fondamentale d'un semiconducteur

Un cristal semiconducteur, transparent pour hc/λ très petit devant le gap E_g, devient opaque lorsque hc/λ dépasse E_g : un photon a alors en effet une énergie suffisante pour exciter un électron de la bande de valence dans la bande de conduction.

On dispose ici de deux échantillons : GaAs, d'aspect "opaque", et GaP, "orange". Utiliser ces simples observations visuelles pour situer les gaps de ces semiconducteurs par rapport aux limites du visible, qui sont 1,6 eV (rouge) et 3,1 eV (bleu).

Détermination du gap de GaP

[1P] Détermination semi-quantitative du gap Une source de lumière blanche (illuminateur) est placée à l'entrée d'un monochromateur. L'échantillon de GaP est plaqué contre la fente de sortie. Placer un écran blanc une vingtaine de centimètres plus loin.

Faire défiler à la main les longueurs d'onde. Observer que le rouge, le jaune, le vert sont transmis, puis que l'échantillon devient opaque aux longueurs d'onde plus courtes.

Déduire du seuil de l'absorption fondamentale ainsi mise en évidence une estimation du gap de GaP.

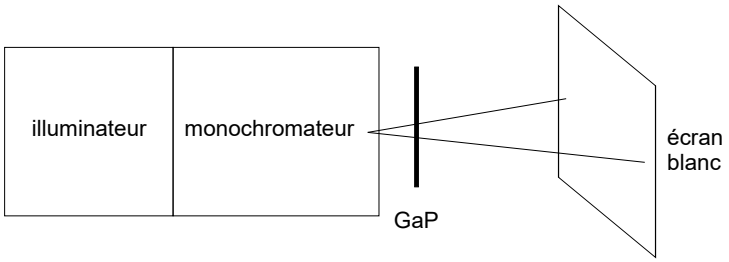

FIGURE 6 –

[1P] Obtention du spectre en transmission du semi-conducteur En utilisant un des spectromètres à réseaux interfacés (dits "USB") et une source de lumière blanche (quartz-iode), on obtient la transmission du semi-conducteur en enregistrant successivement un spectre de la source lumineuse (référence, ou blanc), un spectre de la lumière transmise à travers l'échantillon et en faisant le rapport des deux (ne pas modifier les réglages entre les deux enregistrements). En toute rigueur il faut aussi enregistrer un spectre en absence de lumière (noir).

À partir de la courbe obtenue, déterminer la valeur de la largeur de bande interdite du semiconducteur. Le choix de la position du seuil sur la courbe de transmission est néanmoins délicat.

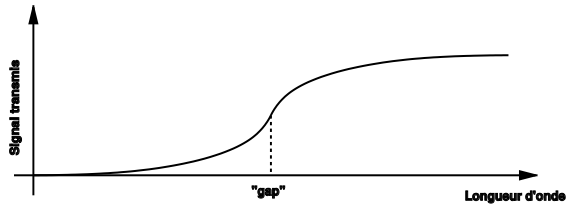

FIGURE 7 –

[2P] Détermination du gap de GaAs Celui-ci se trouve dans le domaine du proche infrarouge. Il est donc nécessaire de modifier le montage précédent pour remplacer l'œil par un détecteur sensible dans l'infrarouge : la photodiode au silicium.

Placer l'échantillon de GaAs contre la fente de sortie, immédiatement suivi par une photodiode au silicium, polarisée en inverse. On prendra pour R une résistance de l'ordre de 100 kΩ.

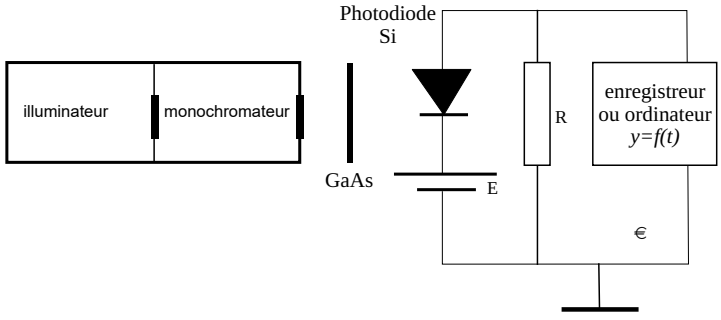

FIGURE 8 –

L'enregistrement n'est pas indispensable. On peut se contenter d'observer "à la main" le signal transmis. Commencer les réglages avec des fentes de l'ordre du mm. Les réduire ensuite si le signal est suffisant.

4.2 Caractérisation d'une DEL blanche

On dispose d'une DEL blanche (Gotronics HUW-01) montée sur un support qui permet de mesurer la tension à ses bornes et qui inclut une résistance de protection $R = 3,3\Omega$. Dans toute l'expérience, on veillera à :

- toujours appliquer un courant électrique dans le sens passant de la diode,
- ne jamais dépasser le courant maximal supporté par la diode. Avec la résistance de protection, et un courant maximum $I_{\max} = 300\text{mA}$, on veillera à ne pas dépasser une tension d'alimentation de $4,2\text{V}$. On contrôlera le courant dans le circuit en mesurant la tension aux bornes de la résistance de protection (il suffit en fait de mesurer deux tensions parmi les trois suivantes : tensions aux bornes de la source, de la diode, et de la résistance).

[1P] Seuil d'émission de la DEL On mesure dans un premier temps la puissance lumineuse émise par la DEL en fonction de la tension à ses bornes. On utilisera pour cela une photodiode ou un puissance-mètre optique. Tracer la puissance optique reçue par le capteur en fonction de la tension U_{diode} en augmentant progressivement la tension d'alimentation **sans jamais dépasser** le courant $I_{\max}$. Constater que la puissance lumineuse croît quasi-linéairement avec la tension de la diode au-delà d'un certain seuil U_{seuil}. Quelle est la valeur du seuil ? Estimer le rendement lumineux de la diode.

On peut répéter l'expérience avec des diodes colorées. Nous disposons dans la collection de plusieurs diodes bleues, rouges, vertes... Pour ces différentes couleurs, mesurer la tension de seuil U_{seuil}. Constater que la tension de seuil est d'autant plus grande que la longueur d'onde de la diode est élevée. On peut aussi tracer U_{seuil} en fonction de la longueur d'onde d'émission mesurée au spectromètre USB. On constate alors que $U_{\text{seuil}} = \frac{hc}{e\lambda}$: l'énergie eU_{seuil} est l'énergie minimale à fournir aux porteurs de charge dans la diode pour qu'ils puissent franchir le gap de la jonction PN de la diode. La désexcitation des porteurs de charge s'accompagne de l'émission d'un photon de longueur d'onde correspondant à l'énergie du gap.

Quelle longueur d'onde d'émission obtient-on pour la DEL blanche ? Enregistrer le spectre d'émission de la DEL blanche avec un spectromètre USB et expliquer le résultat obtenu.

On constate en fait que le seuil d'émission de la DEL blanche est dans le bleu : une DEL blanche est une DEL bleue recouverte d'un milieu fluorescent. On confirme cette observation en enregistrant le spectre d'émission. On observe bien un pic d'émission dans le bleu, suivi d'une spectre de fluorescence à plus grande longueur d'onde.

[2P] Temps de réponse Pour mettre en évidence le fait qu'il s'agit de fluorescence, on peut mettre en évidence le fait que **l'émission bleue** de la diode réagit plus rapidement à une variation de la tension d'alimentation que **l'émission par fluorescence**. On va pour cela enregistrer l'équivalent d'un diagramme de Bode de la DEL blanche :

- on module la tension d'alimentation $u(t)$ de la diode avec un GBF en se plaçant toujours au-dessus du seuil, sans jamais dépasser le courant $I_{\max}$ et avec une amplitude u_0 suffisamment faible pour que l'on puisse considérer la réponse de la DEL comme linéaire en $u(t)$. On peut typiquement choisir $u_0 = 50\text{mV}$.
- on mesure l'intensité lumineuse avec une photodiode que l'on prendra soin d'utiliser avec une résistance la plus petite possible et des câbles coaxiaux courts uniquement (50cm max). Il faut en effet que le diagramme que nous mesurerons ne soit pas limité par le temps de réponse du circuit photodiode lui-même.
- on intercale un filtre passe-bleu ou un filtre rouge isole-raie (578nm) entre la DEL et la photodiode pour enregistrer le diagramme de Bode de l'émission bleue ou de la fluorescence séparément.

Le GBF n'est pas assez puissant pour alimenter en courant la DEL. On intercale donc par ailleurs un amplificateur de puissance (en x1) entre le GBF et la DEL + résistance de sécurité.

Mesurer, avec chacun des deux filtres, et pour une fréquence d'excitation ν comprise entre 100kHz et 10MHz, le rapport $G(\nu)$ des amplitudes du signal de la photodiode et de la tension aux bornes de la DEL puis tracer $G(\nu)/G(100kHz)$ en fonction de ν. Estimer la fréquence de coupure des filtres passe-bas obtenus. On les note ν_{rouge} et ν_{bleu}. On estime alors le temps caractéristique de l'émission par fluorescence par $(\frac{1}{\nu_{\text{rouge}}})^2 = (\frac{1}{\nu_{\text{bleu}}})^2 + \tau_{\text{fluo}}^2$.

4.3 [2P] Diodes électroluminescentes (DEL, ou LED en anglais)

Cette expérience propose une étude des diodes électroluminescentes à partir du spectre de leur émission. Il n'est pas forcément nécessaire de la faire en TP, d'autant plus qu'elle est redondante avec l'expérience précédente. Elle peut cependant être effectuée en montage pour étudier les propriétés d'émission de ces composantes.

L'émission de lumière par une DEL est due à la recombinaison entre les électrons du bas de la bande de conduction et les trous du haut de la bande de valence. La longueur d'onde moyenne du rayonnement produit est donc : $\lambda = hc/E_g$. Pour obtenir une intensité lumineuse notable, il faut créer des porteurs en nombre suffisant ; le moyen le plus efficace est de faire passer un courant dans une jonction P-N polarisée en direct. Etudier par exemple des DEL en $GaAs_xP_{1-x}$. Elles fonctionnent sous quelques volts et quelques dizaines de mA (1,5 V à 2 V pour les DEL rouges, 2 à 3 V pour les autres, 50 mA maximum). Pour limiter le courant dans les DEL, on les branchera à une alimentation stabilisée en tension de l'ordre de 10 V en série avec une résistance de 200 à 300 Ω, comme expliqué plus haut. Ces DEL émettent, selon la formule de l'alliage utilisé (selon x), dans le rouge, le jaune ou le vert.

À l'aide d'un monochromateur ou d'un spectromètre USB, repérer le maximum d'émission, et de cette valeur déduire la largeur de la bande d'énergie interdite (en eV) de l'alliage semiconducteur étudié.

4.4 Photoconductivité : création de porteurs par un rayonnement lumineux

Lorsqu'on éclaire un échantillon de semiconducteur, l'absorption des photons d'énergie supérieure au gap génère des paires électron-trou. L'apparition de ces porteurs excédentaires provoque l'augmentation de la conductivité du matériau. Lorsque l'éclairement s'interrompt, les concentrations de porteurs retournent vers leur valeur à l'équilibre avec une constante de temps caractéristique qui est le temps de vie des porteurs photocréés. Dans le domaine visible, on utilise les photorésistances (ou cellules photoconductrices) au CdS.

[1P] Mise en évidence de la photoconductivité Comme on souhaite un signal donnant accès à la conductivité, proportionnelle à $1/R_L$, le schéma le plus simple auquel on pourrait penser est celui de la figure du montage A ci-dessous :

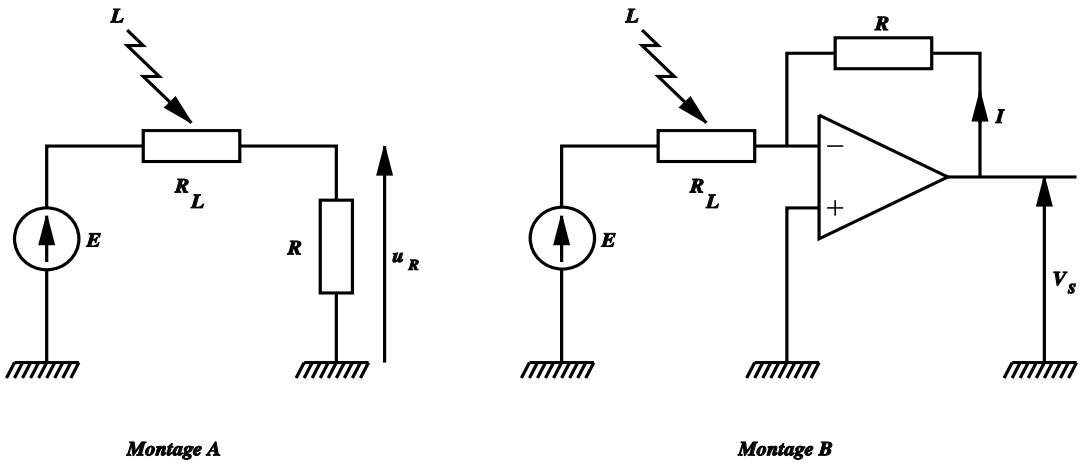

FIGURE 9 –

La mesure de la tension aux bornes de la résistance R donne alors $u_R = ER/(R+R_L)$, qui n'est approximativement égal à ER/R_L qu'à condition que $R \ll R_L$. Or le domaine de variation des résistances des cellules photoconductrices est important : de quelques MΩ pour la résistance d'obscurité à quelques centaines d'Ohms pour les niveaux d'éclairement usuels. Cette approche ne permet donc pas simplement une mesure directe $R \ll R_L$, d'autant qu'avec R petite, la précision de la mesure de u_R est limitée. On propose donc le schéma à A.O. de la figure du montage B. Ce montage permet d'imposer une d.d.p. constante aux bornes de la cellule, et le courant I qui la traverse est alors proportionnel à la conductance de la cellule $V_s = RI = -ER/R_L$. Il n'y a cette fois pas de condition sur R et on

choisira pour celle-ci une boîte AOIP $\times$ 1 kΩ. Attention néanmoins à la saturation possible de l'A.O. On prendra pour E la partie négative (-12 V ou -15 V) d'une alimentation d'A.O.

Élargir un faisceau laser pour éclairer entièrement la photorésistance. Interposer des densités ou utiliser deux polariseurs pour faire varier l'intensité. On notera la non-linéarité du photocourant par rapport à l'éclairement.

[1P] Temps de réponse Éclairer avec une DEL ultra-luminescente alimentée en signaux carrés dissymétriques (0,+E) de façon à avoir un courant inférieur à 30 mA (E=10 V avec une résistance de 300 Ω). Faites attention à ne pas griller la DEL (pendant les réglages du GBF, la débrancher).

Observer à l'oscillo le signal de sortie V_s. On obtient un temps de réponse de l'ordre de 10 ms. Il n'est pas ici nécessaire de mesurer précisément ce temps de réponse, car il dépend du niveau d'éclairement. En toute rigueur, il faudrait étudier également le signal de la DEL avec une photodiode, pour vérifier que ce n'est pas le processus d'émission de lumière qui limite le temps de réponse.

Ce temps de réponse, très grand, est directement relié au temps de vie des électrons dans le composant photorésistance (voir Asch page 156, et pas à un éventuel temps électrique *RC* comme cela est parfois mentionné). C'est d'ailleurs ce temps de vie élevé des porteurs qui explique la grande sensibilité de la photorésistance.

[AP] Réponse spectrale Le protocole à suivre est celui décrit dans le TP "Photorécepteurs" de la série I pour l'étude de la photodiode. Mettre la photorésistance derrière la fente de sortie du monochromateur. On pourra soit faire une détermination rapide à la main de la longueur d'onde correspondant au maximum de photoconductivité, soit une étude complète de la réponse spectrale. En déduire une valeur approchée du gap de CdS.

Interprétation de la courbe "en cloche" observée :

- du côté des grands λ, le signal chute quand le cristal devient transparent ($\lambda > \lambda_g$, seuil de l'absorption fondamentale) ;
- du côté des petits λ, le coefficient d'absorption devient très grand. La lumière est absorbée en surface, où les porteurs photocréés ont une durée de vie trop faible pour contribuer efficacement à la conduction.