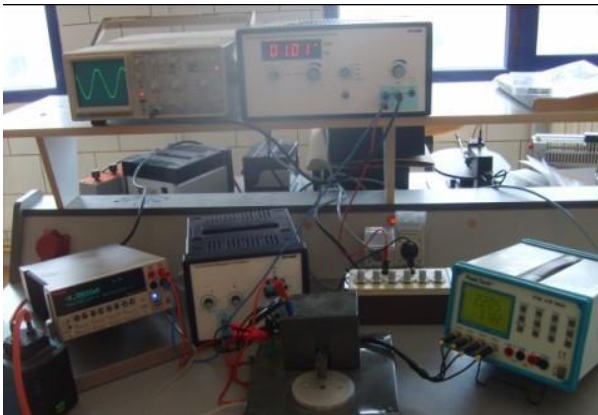


Université de Djelfa
Faculté des Sciences Exactes et
Informatique
Laboratoire des Sciences et Informatique
des Matériaux

Dr. Abdelkrim NAAS

Physique des semiconducteurs (*TRAVAUX PRATIQUES*)



Cycle : LMD
Niveau : 3^{ème} Licence
Option : Physique des Matériaux

Sommaire

Avant propos	2
Conseils sur le déroulement de l'expérience	3
Rappels utiles	4

Travaux pratiques

1. Mesure du Gap d'un semi conducteur	7
2. Mesure de la résistivité et la conductivité d'une couche mince par la méthode des 4 pointes	14
3. Caractéristiques courant-tension d'une jonction PN	24
4. Effet de la température sur la caractéristique courant-tension d'une jonction PN	33
5. Effet Hall	38
6. Effet Zener	45

Annexes

Annexe 1 Aide sur Origin	50
Annexe 2 Certificat Wafers Silicium	59
Annexe 3 Oxyde d'indium-étain ITO	60

Avant propos

Ce fascicule de travaux pratiques est destiné principalement aux étudiants de la 3^{ème} année Licence Physique des Matériaux. Il peut également être utilisé avec profit par tout étudiant suivant un cours de semiconducteurs. Il contient la description de six travaux pratiques (6 TPs) à travers lesquels, l'étudiant devrait vérifier et approfondir ses connaissances théoriques d'une part et acquérir un savoir faire expérimental d'autre part, et ce dans un domaine aussi passionnant que celui des matériaux et en particulier des semiconducteurs.

L'ensemble de ces travaux pratiques est réalisable avec des moyens simples que tout laboratoire de mesures en dispose. Les résultats obtenus sont comparables à ceux issus d'expériences mettant en œuvre des équipements spécialisés et onéreux.

Chaque expérience décrite comporte 3 parties : le but de manipulation qui en définit les objectifs de façon claire, précise et quantifiable, une partie théorique qui consiste en un rappel théorique du sujet de l'expérience et une partie pratique dans laquelle est décrit le mode opératoire

Conseils sur le déroulement de l'expérience

Au cours des manipulations, des précautions sont nécessaires à prendre :

- Sécurité : il est important avant toute manipulation de vérifier que l'ensemble des appareils n'est pas alimenté (les équipements en mode off).
- Avant le lancement des mesures, laisser d'abord l'enseignant vérifier le montage.
- Certains échantillons sont sensibles et peuvent être facilement contaminés au toucher ; porter des gants ou/et utiliser la pince spéciale.
- Certains échantillons sont fragiles ; faire attention pendant leur manipulation.
- Vérifier toujours les calibres des appareils de mesures.
- Pour le tracé des courbes, il est obligatoire d'utiliser l'outil informatique (utilisation du logiciel Origin ou autres comme Excel)

A l'issue de chaque expérience un rapport doit être rédigé. Ce rapport contient :

- Une page de garde qui porte le nom de l'étudiant, le numéro de TP, le titre de l'expérience et l'année en cours.
- Une petite introduction où l'étudiant indique le but de la manipulation.
- Une description théorique,
- La réponse aux questions demandées.
- Une conclusion qui résume/discute les résultats obtenus.

Rappels utiles

Constantes physiques

Vitesse de la lumière	$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
Charge élémentaire	$e = 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Nombre d'Avogadro	$N_A = 6,02204 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Constante des gaz parfaits	$R = 8,3144 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
Constante de Faraday	$F = 96484 \text{ C.mol}^{-1}$
Constante de Boltzmann	$k_B = 1,38066 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
Constante de Planck	$h = 6,62617 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
Masse de l'électron	$m_e = 9,10953 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Masse du neutron	$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Masse du proton	$m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Permittivité du vide	$\epsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
Perméabilité du vide	$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}$

Unités particulières

$1 \text{ eV} = 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
$\hbar = 1,054590 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
$1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$
$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$
$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$
$1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$
$1 \text{ cm} = 10^{-3} \text{ m}$

Conversions

$$E = h\nu, \lambda = \frac{c}{\nu}, E = k_B T$$

Lecture d'une valeur d'un appareil

Pour lire une valeur sur un appareil électrique analogique (Ampèremètre ou Voltmètre par exemple), on doit avoir :

- Le calibre, qui est la plus forte valeur mesurable par l'appareil. L'appareil comporte plusieurs calibres. Le manilleur calibre choisi est celui où l'aiguille est sur le maximum de l'échelle du cadran.
- L'échelle est le nombre de divisions sur le cadran.
- La lecture est la valeur sur laquelle se positionne l'aiguille.
- la valeur réelle à mesurer est donnée par la relation suivante :

$$Valeur_{mesur\ é} = \frac{Calibre \times Lecture}{Echelle}$$

IMPORTANT : Au début de la manipulation, si on ne connaît pas l'ordre de grandeur de la valeur à mesurer, on prendra toujours le calibre le plus fort. Si la déviation de l'aiguille est trop faible, on diminuera le calibre jusqu'à ce qu'on puisse faire mesure dans la moitié supérieure du cadran de l'appareil.

Incertitudes sur les mesures

Il n'y a pas d'appareil juste. Nous ne pouvons pas donc être certains de l'exactitude d'une valeur lue; il y a une incertitude sur chaque lecture qui ne peut être qu'évaluée.

Plusieurs causes d'erreurs interviennent dans le résultat d'une mesure comme :

- Causes d'erreur grossières : échantillon mal placé, mauvais contact, bornes mal serrées, mauvaise méthode de mesure, ...
- Causes théoriquement prévisibles mais difficiles à estimer : mesure à une température autre que la température

d'étalonnage, le seul fait d'introduire l'appareil de mesure dans un circuit change son état.

Erreurs de résultats de mesurages

On appelle erreur de mesurage la discordance entre les résultats de mesurage et la valeur de la grandeur mesurée. Différentes erreurs de causes variées sont rencontrées :

- Erreur systématique : c'est une erreur qui reste constante en valeur absolue en signe lorsque plusieurs mesures d'une même grandeur fixe sont réalisées dans les mêmes conditions, leurs causes peuvent être connues ou non.
- Erreur aléatoire : c'est une erreur qui varie de façon imprévisible en valeur absolue et en signe lorsqu'on effectue un grand nombre de mesures d'une même grandeur dans des conditions pratiquement identiques.
- Erreur parasite : c'est une erreur souvent grossière qui résulte d'une exécution incorrecte de la mesure. Elle peut être due à une fausse lecture, ou encore au mauvais emploi d'un instrument.

Notions d'incertitude

- **Incertainitude absolue :**

C'est le maximum Δx de l'écart que nous risquons d'avoir entre la vraie valeur x_v et la valeur x_0 mesurée.

- **Incertainitude relative :**

C'est le rapport de l'incertainitude absolue Δx par la valeur mesurée x_0 .

$$\text{incertainitude relative} = \frac{\Delta x}{x_0}$$

TP1

Mesure du Gap d'un semi-conducteur

I. But

- Mesure de Gap E_g d'un semi conducteur
- Identification du semi conducteur

II. Rappel théorique

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé à l'aide de la théorie des bandes d'énergie. Selon celle-ci, un matériau semiconducteur possède une bande interdite suffisamment petite pour que des électrons de la bande de valence puissent facilement rejoindre la bande de conduction. Si un potentiel électrique est appliqué à ses bornes, un faible courant électrique apparaît, provoqué à la fois par le déplacement des électrons et par celui des « trous » qu'ils laissent dans la bande de valence. Il y a des semiconducteurs intrinsèques qui sont purs et des semi-conducteurs extrinsèques qui sont des semi-conducteurs dopés

Dans ce travail pratique, Nous allons étudier une thermistance du commerce CTN constituée d'un semiconducteur dopé. Le semiconducteur peut être de type n si la conduction est assurée par les électrons libérés par les donneurs, ou de type p si la conduction est assurée par les trous créés par les accepteurs. La figure 1 montre le modèle simplifié de la structure des bandes de ces deux types.

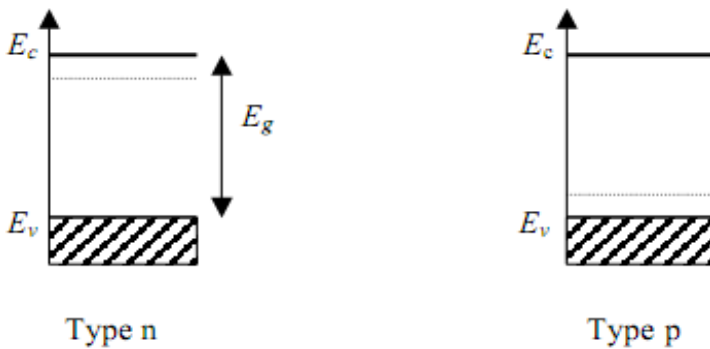


Figure 1 : Bandes d'énergie des semiconducteurs n et p

Le niveau d'énergie en pointillé est celui des impuretés qui dopent le semiconducteur. Pour la suite des explications nous supposons que la thermistance est constituée d'un semiconducteur de type n. Le cas d'une thermistance de type p se traite de la même façon.

Aux basses températures, mais suffisantes quand même ($kT > \Delta E$), les donneurs libèrent leur électron dans la bande de conduction. Lorsque toutes les impuretés sont ionisées, la densité de porteurs libres devient indépendante de la température, et donc la

résistance aussi. La conduction est alors dite extrinsèque car elle est assurée par les dopants.

A plus haute température ($kT > E_g/2$), des paires électron-trou se créent directement au milieu de la bande interdite par excitation thermique, produisant chacune un électron dans la bande de valence et un trou dans la bande de conduction. Ce mécanisme devient rapidement prépondérant. La conduction est alors dite intrinsèque. Ce mécanisme suit la loi de Boltzmann (nombre d'électrons libres créés $\sim \exp(-E_g / 2kT)$) par conséquent la résistance varie en :

$$R = R_0 \exp(E_g / 2kT)$$

Pour mettre ces comportements de la thermistance en évidence on trace $\ln(R) = f(1/kT)$. (Figure 2)

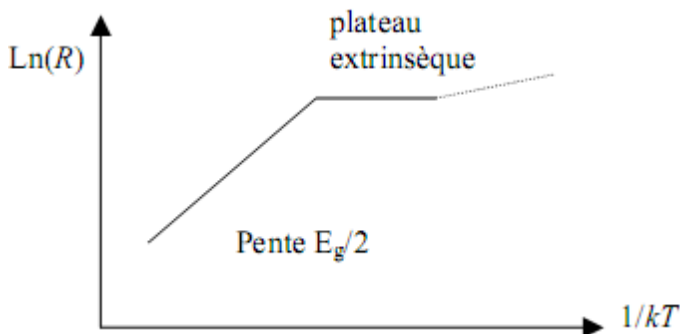


Figure 2 : Variation de la résistance de la thermistance avec la température

Ordre de grandeur: gap des semiconducteurs usuels:

$E_g(\text{Ge})=0.7\text{eV}$, $E_g(\text{Si})=1.1\text{eV}$, $E_g(\text{GaAs})=1.4\text{eV}$, $E_g(\text{GaP})=2.3\text{eV}$,
 $E_g(\text{CdS})=2.4\text{eV}$

III. Travail pratique:

Expérience 1

Mesure de gap d'un semiconducteur d'une CTN

La figure 3, montre le montage expérimental a réalisé.

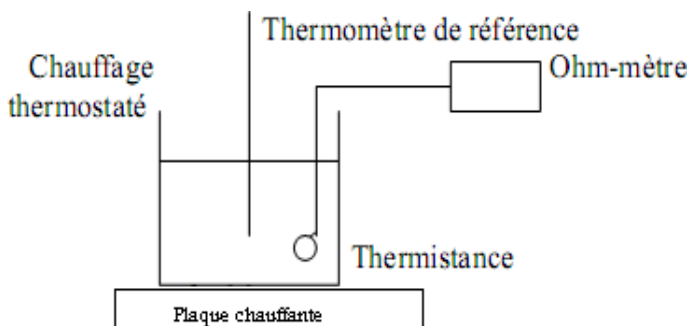


Figure 3 : Synoptique du montage expérimental

Matériel:

- Thermistance CTN
- Plaque chauffante + thermomètre
- Ohm mètre
- Bucher + eau+ glace+ acétone

Plonger la thermistance dans un bain thermostaté. Tous les cinq degrés environ, pour chaque valeur de la température noter la valeur de la résistance à l'aide d'un ohmmètre.

Faire ensuite une mesure de la résistance à 0°C en prenant de la glace fondante. Prendre de la glace arrosée d'acétone pour faire une mesure entre -20°C et -30°C.

1) Compléter le tableau ci-dessous

T (°C)														
R(Ω)														
1/Tx10 ⁻³ (K ⁻¹)														

Faire une mesure de 15 points

2) Tracer la droite $\ln(R)=f(1/kT)$. Déterminer la pente.

3) Comparer la valeur mesurée avec la valeur tabulée. Déduire la nature du semiconducteur.

Expériences 2

Mesure de gap d'un échantillon type ITO

La figure 4 montre le montage synoptique de l'expérience.

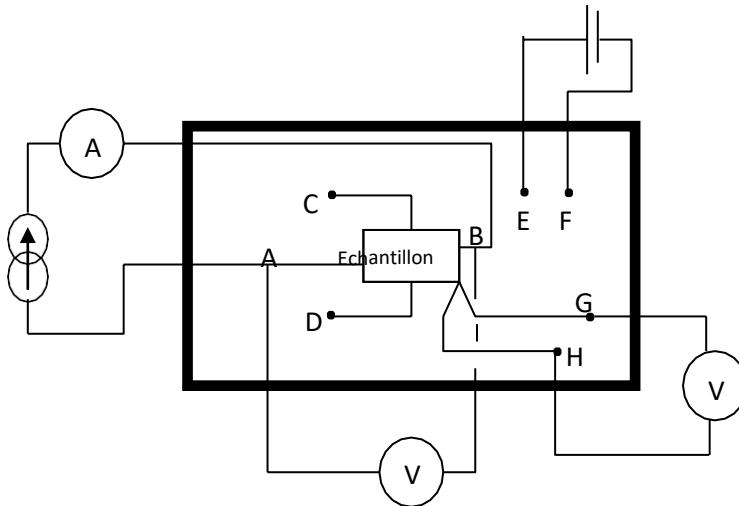


Figure 4 : Synoptique du montage expérimental exp 2

Une plaquette comporte un dispositif permettant de chauffer par effet joule l'échantillon de l'oxyde d'indium dopé à l'étain nommé ITO (bornes E et F). Un thermocouple cuivre type k, placé au niveau de l'échantillon, permet de mesurer la température (bornes G et H)

La relation permettant la conversion entre la tension aux bornes du thermocouple V_{th} et la température est:

$$T(K) = \frac{V_{th}(mV)}{40.10^{-3}} + T_{\text{ambiante}} \quad (K)$$

1) Réaliser une montée en température progressive en jouant sur la tension de chauffage. Mesurer la tension aux bornes de l'échantillon ainsi qu'aux bornes du thermocouple.

Compléter le tableau ci-dessous:

V_{Ge} (V)										
V_{th} (mV)										
T_{Ge} (K)										
$1/T \times 10^{-3}$ (K^{-1})										

2) Représenter $\ln(V)=f(1/T)$

3) Interpréter l'allure de la courbe selon la théorie

4) Mesurer E_g de l'échantillon en se basant sur la partie théorique du 1^{er} paragraphe

5) Conclusions

TP2

Mesure de la résistivité et la conductivité d'une couche mince (semiconducteur) par la méthode des 4 pointes

I. But:

- Caractérisation électrique d'une couche mince d'un semiconducteur
- Détermination du type du semi conducteur,
- Mesure de la résistivité et de la conductivité du semiconducteur par la méthode des 4 pointes.

II. Expérience 1

II.1 Objectif

Détermination du type du semiconducteur par la méthode de la pointe chaude

Les échantillons semiconducteurs sont des wafers circulaires de silicium de différents dopages.

Cette technique est utilisée pour déterminer le type de conductivité d'un semi-conducteur avant même de déterminer la concentration des porteurs. (Figure 1)

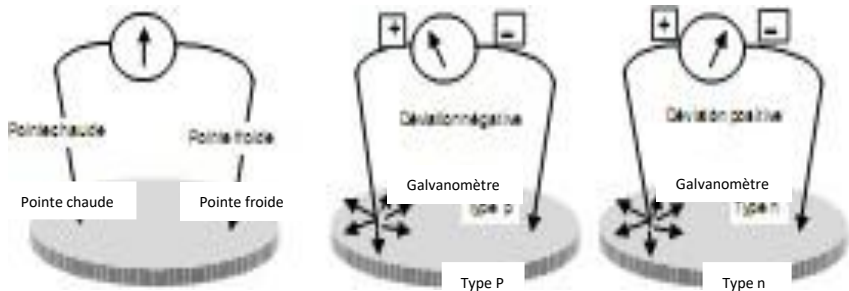


Figure 1 : Schéma expérimental du montage du de la pointe chaude

L'outillage nécessaire pour effectuer cette expérience est très simple : composé d'un fer à soudé et d'un galvanomètre.

II.2 Travail demandé

- Chauffer la pointe de l'une des électrodes d'un milliampèremètre par un fer à soudé ou une allumette.
- Appliquer les deux électrodes à la surface du semiconducteur, l'aiguille subit une déviation qui indique le type des porteurs majoritaires.
- Si la déviation de l'aiguille est vers le sens positif cela implique que le semiconducteur est type P si non si c'est vers le sens négatif donc le semiconducteur est de type n. pour l'ensemble des échantillons classifier ceux qui sont type p ou type n.
- Explique le principe sur lequel est basée cette expérience.

III. Expérience 2

III.1 Objectif

Mesure de la résistivité et de la conductivité du semiconducteur par la méthode des quatre pointes.

III.2 Rappel théorique:

La méthode 4 pointes est utilisable pour mesurer la résistivité d'une couche mince. La technique consiste à placer 4 pointes dont 2 traversent un courant I et les deux autres, on mesure la tension V (figure 2) et par application de la loi d'Ohm, on peut déterminer la résistance carrée R_{\square} .

La résistance carrée à pour unité de mesure $\Omega \cdot \text{cm}$.

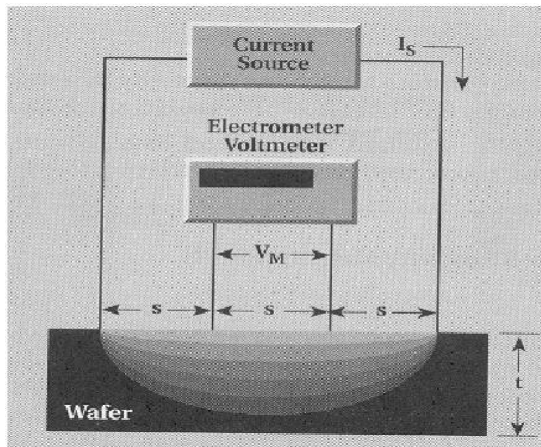


Figure 2 principe de la mesure 4 pointes

Le développement du formalisme mathématique conduit à:

$$dr = \rho \frac{dr}{\pi r d} \quad \text{et} \quad R = \frac{\rho}{\pi d} \int_s^{2s} \frac{dr}{r} = \frac{\rho}{\pi d} \ln 2$$

$$\text{Or, } R = \frac{V}{I} \text{ et } R_{\square} = \frac{\rho}{d}$$

Pour des échantillons épais (épaisseur $t \gg s$)

$$R = 2\pi s \frac{V}{I}$$

Pour des couches minces (épaisseur $t \ll s$)

$$R = \frac{\pi V}{\ln(2)I} = 4.53 \frac{V}{I}$$

Le coefficient 4.53 est un coefficient correcteur qui n'est valable que si la distance entre les pointes est très petite par rapport à la longueur et la largeur de la couche.

III.3 Dispositif expérimental

Le dispositif est constitué d'un porte wafer (figure 3-a) avec sonde à 4 pointes (figure 3-b), le kit est de marque JANDEL (Multiposition Wafer Probe).

Un courant I fourni par un générateur de courant (source de courant) est délivré aux pointes 1 et 4 et une tension est mesurée par un voltmètre de précision à travers les pointes 2 et 3.

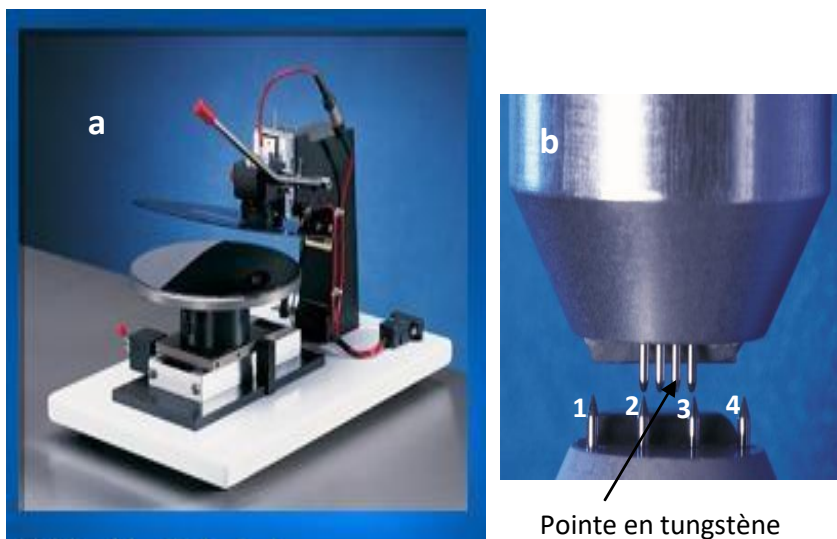


Figure 3 Dispositif du porte wafer porte wafer (marque JANDEL
(Multipositions Wafer Probe).

La source de courant est délivrée par un Source Mètre type KEITHLEY 2400 (figure 4) et la mesure de la tension est effectuée par multimètre numérique de précision.



Figure 4 : Source Mètre KEITHLEY 2400

La figure 5, montre une image du montage complet de l'expérience des 4 points



Figure 5 : Image de l'expérience des 4 points

III.4 Travail demandé

III.4.1 Utilisation de l'appareil KEITHLEY 2400:

Deux fonctions : multimètre de grande précision et source mètre. La figure 6, illustre la face avant de cet appareil.

SourceMeter front panel



Figure 6 : Face avant du Source Mètre

La fonction Multimètre : Ampèremètre I, Voltmètre V, Ohm mètre Ω et Wattmètre FCTN

Pour choisir une fonction, il suffit appuyer sur le bouton où le symbole est écrit

Application 1:

- Brancher aux bornes Input/Output HI et LO une résistance R
- Appuyer sur le bouton Ω (coté **MEAS**) puis le bouton **ON/OFF**
- L'afficheur indique la valeur de la résistance, comparer les deux valeurs.

La fonction source mètre :

Application 2:

Keithley comme Source de tension :

- Brancher aux bornes Input/Output **HI** et **LO** un voltmètre numérique
- Appuyer sur le bouton **V** (coté **SOURCE**)
- Appuyer sur Edit (bouton bleu) pour générer une tension, sur l'afficheur **Vsrc** choisir la valeur voulue, pour cela il faut choisir le rang de la tension V, mV ou μ V en appuyant sur les touches RANGE (choisir 1.5V comme exemple pour éditer cette valeur on utilise les touches **LOCAL/REL, FILTER/LIMIT ...** où il est indiqué les chiffres).
- Appuyer sur le bouton **ON/OFF**, comparer les résultats.

Application 3:

Keithley comme Source de courant:

- Brancher aux bornes Input/Output HI et LO un ampèremètre en série avec une résistance de protection de $1K\Omega$
- Appuyer sur le bouton I (coté **SOURCE**)

- Appuyer sur Edit (bouton bleu) pour générer une tension, sur l'afficheur **Isrc** choisir la valeur voulue, pour cela il faut choisir le rang du courant A, mA ou μ A en appuyant sur les touches **RANGE** (choisir 105mA comme exemple pour éditer cette valeur on utilise les touches **LOCAL/REL, FILTER/LIMIT ...** où il est indiqué les chiffres).
- Appuyer sur le bouton **ON/OFF**, comparer les résultats.

Application 4:

Programmation d'une variation linéaire d'une série de valeurs de tension en output

- Appuyer sur la touche **SOURCE V**
- Appuyer sur **CONFIG** puis **SWEEP**
- Choisir **TYPE** (voir bas de l'afficheur où est indiqué **TYPE SWEEP-COUNT..**) puis appuyer sur **ENTER**
- Choisir **STAIR** puis **ENTER**, l'afficheur indique la première valeur choisir 0V puis **ENTER**, l'afficheur indique la dernière valeur **STOP** choisir 1V puis **ENTER**,
- L'afficheur indique le pas d'incrémentation **STEEP**, on fait une variation de 100mV puis appuyer sur **ENTER** après sur **EXIT**
- Brancher le voltmètre et appuyer sur **ON/OFF** pour exécuter le programme et en fin appuyer sur **SWEEP** voir le résultat de la variation de V sur le voltmètre. (même l'afficheur de source mètre indique cette variation.

Programmation d'une variation linéaire d'une série de valeurs de Courant en output

- Appuyer sur la touche **SOURCE I**
- Appuyer sur **CONFIG** puis **SWEEP**
- Choisir **TYPE** (voir bas de l'afficheur où est indiqué **TYPE SWEEP-COUNT..**) puis appuyer sur **ENTER**

- Choisir **STAIR** puis **ENTER**, l'afficheur indique la première valeur choisie 0 mA puis **ENTER**, l'afficheur indique la dernière valeur **STOP** choisie 100V puis **ENTER**,
- L'afficheur indique le pas d'incréméntation **STEEP**, on fait une variation de 10mV puis appuyer sur **ENTER** après sur **EXIT**
- Brancher l'ampèremètre (choisir le bon calibre) et appuyer sur **ON/OFF** pour exécuter le programme et en fin, appuyer sur **SWEEP** voir le résultat de la variation de I sur l'ampèremètre. (même l'afficheur de source mètre indique cette variation.

III.4.2 Mesure de la conductivité du semiconducteur

Vous disposer d'une série de wafers de semiconducteur silicium dont les caractéristiques sont données en annexe

- 1) Relier la sortie 1 du KEITHLEY (ou de la source de courant) aux bornes courant du support de wafer de la figure 4,
- 2) Relier la sortie 2 du KEITHLEY (ou de voltmètre) aux bornes tension du support de wafer
- 3) Faire glisser un wafer dans la plaque qui les porte du support wafer (**prenez soin a ne pas toucher le wafer avec la main, utiliser la pince ou les gants**)
- 4) Ouvrir le compresseur à air pour maintenir le wafer et faire le contact des 4 points à l'aide du poignet. (Le contact se fait délicatement car il est fragile)
- 5) Programmer une série de courants (nombre de mesures 10 Points)
- 6) A l'aide du voltmètre relever les tensions V en complétant le tableau ci-dessous
- 7) Changer la position des pointes pour chaque mesure (4positions)
- 8) Refaire le même travail pour les autres wafers.
- 9) Tracer pour chaque wafer la courbe $V=f(I)$. En traçant la pente, déduire la valeur de la résistance R puis déterminer la résistivité et la conductivité de l'échantillon (remarque la

résistivité est obtenue en se basant sur le diamètre et l'épaisseur de l'échantillon voir annexe)

- 10) Comparer les résultats obtenus avec les données indiquées par le constructeur

I (mA)										
V _{position1} (mV)										
V _{position2} (mV)										
V _{position3} (mV)										
V _{position4} (mV)										

TP3

Caractéristiques courant-tension d'une jonction PN

I. But

- Caractéristique directe et inverse d'une jonction brute jonction de laboratoire.
- Effet des contacts sur les propriétés de conduction.
- Caractéristique directes et inverse d'une diode commerciale.
- Etude comparative entre les différentes caractéristiques.

II. Rappel théorique

II.1 Formation d'une jonction PN

En juxtaposant une zone dopée P et une zone dopée N à l'intérieur d'un cristal de semiconducteur, comme sur la figure 1, on obtient une jonction PN.

Dans la pratique on peut par exemple partir d'un monocristal de silicium dopé P à la surface duquel est déposé une fine couche d'un corps pentavalent (phosphore ou arsenic). En chauffant le cristal à une température suffisante, comprise entre la température de fusion du corps déposé et celle du monocristal, des atomes du corps déposé pénètrent dans le cristal par diffusion et créent une zone N.

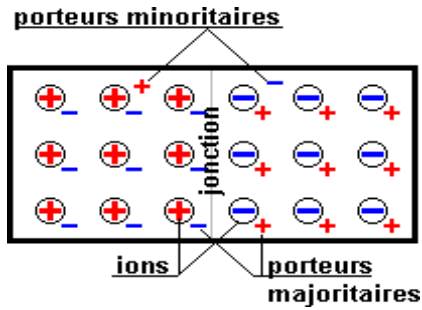


Figure 1 : Jonction PN

La zone de transition

De part et d'autre de la jonction, les porteurs majoritaires (électrons et trous) s'attirent et se recombinent ; leurs charges s'annulent il y a raréfaction des porteurs donc fortes diminutions de la conductibilité dans une zone (la zone de transition) de très faible épaisseur (de l'ordre du micron). Entre les deux zones habitées par des ions de polarités contraires s'établit une différence de potentiel.

La jonction PN s'apparente à un condensateur dont le diélectrique serait la zone de transition ou zone de charge d'espace et les zones P et N les armatures (voir figure 2).

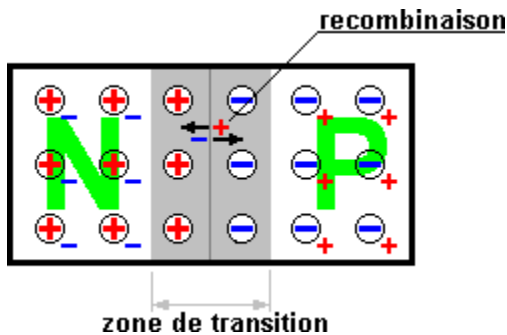


Figure 2 : Modèle de la jonction PN montrant la zone de transition

II.2 Symboles

Le dipôle constitué par le cristal de semiconducteur divisé par la jonction PN est une diode dont l'anode correspond à la zone P et la cathode à la zone N.

Le symbole d'une jonction est sur la figure 3

- Symbole électrique d'une diode
- Symbole commerciale

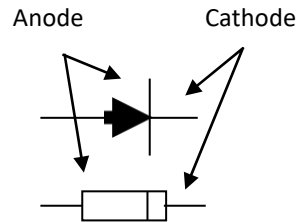


Figure 3 : Symbole de la jonction PN

Dans le laboratoire, on utilise 3 types de jonction: brute sans contacts métalliques, brute avec contacts métalliques et jonction commerciales (diode commerciale) (voir figure 4)

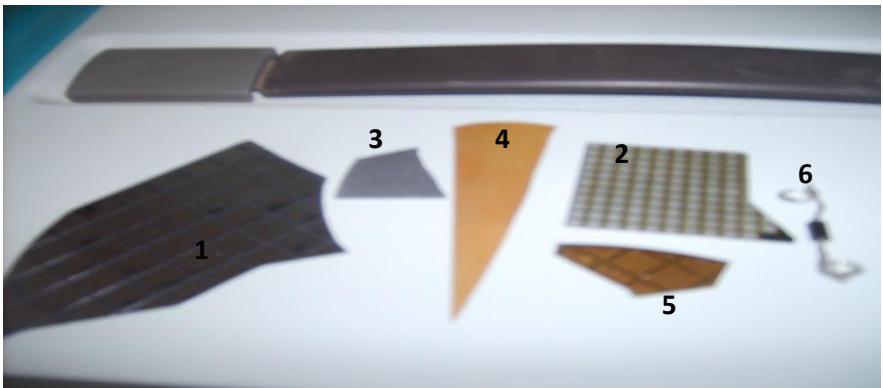


Figure 4 : Échantillons des différentes jonctions PN

On note :

1-> Diode sans contactes

2 -> Diode face contacte en Al

3-> Diode face arrière sans contacte ohmique

4-> Contacte Ohmique en or

5-> Anode en or

6-> Diode commerciale

II.3 Polarisation d'une diode

Une diode peut être polarisée sous deux formes : Une polarisation **en directe** où l'anode est à la borne positive de la tension d'entrée, la cathode à la borne négative de la tension V_e (figure5 a).

Une polarisation en **inverse** où l'anode est à la borne négative de la tension d'entrée, la cathode à borne positive de la tension V_e (figure 5 b).

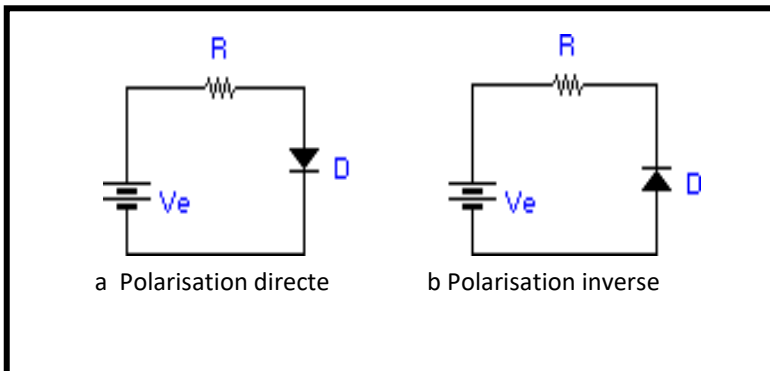


Figure 5 : Schéma électrique de la polarisation directe et inverse d'une diode

II.4 Modélisation mathématiques

Le courant I traversant la diode est lié à la différence de potentiel V par la relation :

$$I = I_s [\exp(qV/KT) - 1]$$

Dans le cas de la polarisation directe on note V_d et I_d ; la relation de I devient :

$$I_d = I_s [\exp(qV_d/KT) - 1]$$

mais dans le cas de la polarisation inverse le courant I et la tension V s'inversent et deviennent $-I_i$ et $-V_i$:

$$I_i = I_s [1 - \exp(-V_i/E)]$$

II.5 Caractéristiques courant-tension

Le graphe de la figure 6 illustre la caractéristique courant-tension de la diode dans les deux sens (directe et inverse) avec:

- Elle est de 0.3V pour le Germanium et de 0.7V pour le Silicium.
- La résistance dynamique est l'inverse de la d'un point de fonctionnement, elle est donnée par :

$$\rho = \left. \frac{\Delta U}{\Delta I} \right)_{I=I_0}$$

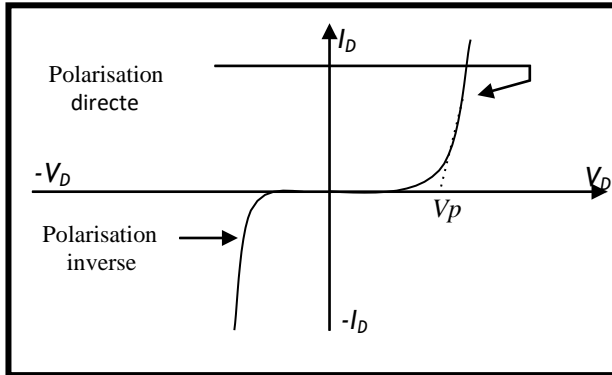


Figure 6 : Caractéristiques courant-tension $I(V)$ d'une jonction PN

Travail demandé

Réaliser le montage de la figure 5a pour la polarisation directe et le montage de la figure 5b pour la polarisation inverse. Ajouter un ampèremètre en série et un voltmètre aux bornes de la jonction en respectant la polarité des appareils.

La figure 7 montre une image du kit expérimental.

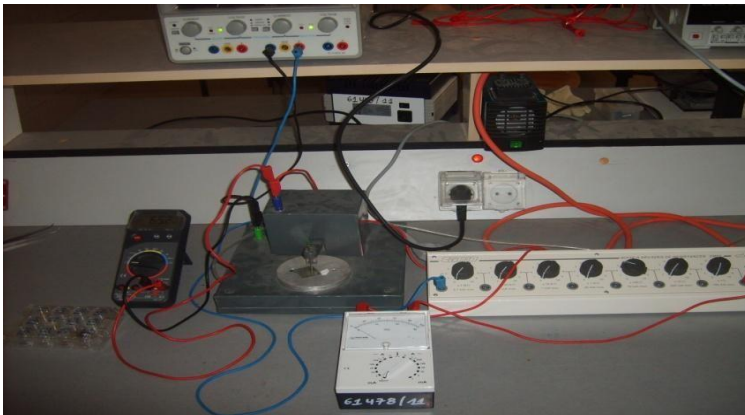


Figure 7 : Montage expérimental pour l'étude des caractéristiques $I(V)$ d'une jonction PN

III.1 Jonction brut sans contacts des deux cotés

(Cas de l'échantillon 1 de la figure 5)

- 1) Compléter les tableaux suivants

Polarisation directe

V_{source} (V)	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	3	5	8	10	11	12
V_d (V)												
I_d (mA)												

Polarisation inverse

V_{source} (V)	-10	-20	-50	-70	-80	-100	-120	-130	-140	-150
V_d (V)										
I_d (mA)										

- 2) Refaire les mesures pour une autre jonction du wafer (une autre diode pour augmenter la précision de la mesure.
- 3) Tracer $I=f(V)$ des deux jonctions pour la polarisation directe et inverse dans un même repère.
- 4) Que pouvons dire sur l'allure (courbes) des deux polarisations ?

III.2 Jonction brut avec contacte métallique et sans contacte ohmique

Le contacte métallique de la jonction: l'anode en aluminium pas de contacte ohmique en face arrière du wafer (cathode)

- 1) Refaire les mêmes mesures que pour le premier cas (polarisation directe et inverse)
- 2) Refaire les mesures pour une autre jonction (diode) du même wafer.
- 3) Tracer $I=f(V)$ des deux jonctions pour la polarisation directe et inverse dans un même repère.
- 4) Déduire la tension seuil pour laquelle I augmente rapidement.
- 5) Que pouvons dire pour le cas de la polarisation inverse.

III.3 Jonction brut avec contacte métallique et contacte ohmique

Les contactes métalliques de la jonction: l'anode en aluminium et la cathode en or

- 1) Refaire les mêmes mesures que pour le premier cas (polarisation directe et inverse)
- 2) Refaire les mesures pour une autre jonction (diode) du même wafer.
- 3) Tracer $I=f(V)$ des deux jonctions pour la polarisation directe et inverse dans un même repère.
- 4) Déduire la tension seuil pour laquelle I augmente rapidement.
- 5) Que pouvons dire pour le cas de la polarisation inverse.

III.4 Diode commerciale

- 1) Tracer $I=f(V)$ pour la polarisation directe et inverse dans un même repère.
- 2) Dédire la tension seuil pour laquelle I augmente rapidement.
- 3) Que pouvons dire pour le cas de la polarisation inverse ?
- 4) Traces sur le même repère les profils de l'ensemble des jonctions pour le cas de la polarisation directe seulement.
- 5) Que pouvons conclure sur ce résultat ?

TP4

Effet de la température sur la caractéristique courant-tension d'une jonction PN

I. But

- Etude de l'effet de la température sur la caractéristique courant-tension $I(V)$ d'une diode à jonction

II. Rappel théorique

La température de fonctionnement est un paramètre fondamental dans la détermination du fonctionnement des dispositifs à semiconducteurs.

Dans le cas de la jonction PN le courant de saturation est essentiellement dû aux porteurs minoritaires générés par agitation thermique. Ce courant de saturation sera donc particulièrement sensible à la température.

L'effet de la température sur la caractéristique directe est déterminé par les relations suivantes:

$$I_D = I_S \exp\left(\frac{qV_j}{k_B T} - 1\right)$$

avec : $I_s = KT^m \exp \frac{-k_{g0}}{2kT}$

Où : m=2 pour le Germanium, m=1.5 pour le Silicium et m=1.5 pour L'arséniure de Gallium.

Pour trouver l'influence de la température sur la caractéristique de la jonction on dérive l'expression simplifiée du courant soit :

$$I = I_s \exp \frac{V}{kV_T}$$

avec $V_T = \frac{kT}{q}$

Le développement de ce formalisme conduit à :

$$\frac{dI}{dT} = \frac{dI_s}{dT} \cdot e^{\frac{V}{kV_T}} + \frac{dV}{dT} \cdot \frac{I_s}{kV_T} \cdot e^{\frac{V}{kV_T}} - I_s \cdot \frac{q \cdot V}{kk \cdot T^2} \cdot e^{\frac{V}{kV_T}}$$

$\frac{dI_s}{dT}$ représente la variation du courant inverse en fonction de la température.

Cherchons maintenant la variation $\frac{dV}{dT}$ lorsque le courant I est maintenu constant (à l'aide d'un circuit extérieur) soit $dI = 0$ dans l'expression précédente.

Le calcul donne :

$$\frac{dV}{dT} \approx 25 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

La figure 1 montre l'allure de $I=f(V)$ pour différentes températures.

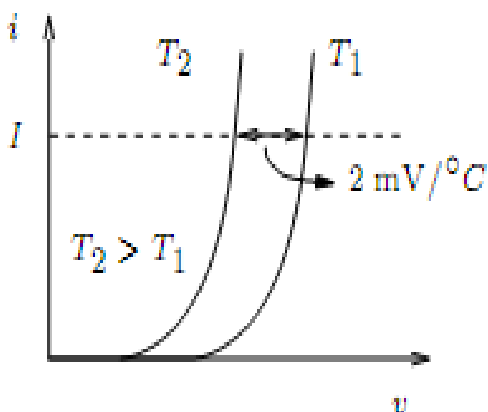


Figure 1 : Allure de $I=f(V)$ pour différentes températures

III. Dispositif expérimental

Le kit expérimental est réalisé au niveau du laboratoire, il comprend un four à température réglable de l'ambient jusqu'à 100°C . La diode est introduite dans ce four, l'anode et la cathode sont reliées au système de mesure (générateur de tension variable, voltmètre et ampèremètre). La figure 2 montre le montage.

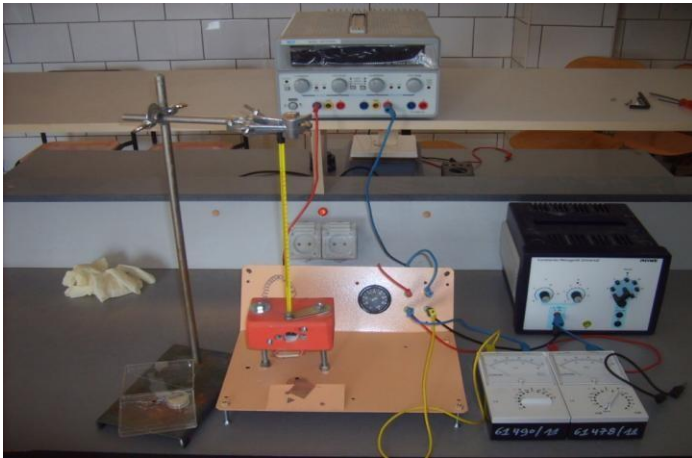


Figure 2 : Dispositif expérimental du kit qui étudier l'effet de la température sur la caractéristique $I(V)$ de la jonction PN

La figure 3 représente le schéma synoptique du kit.

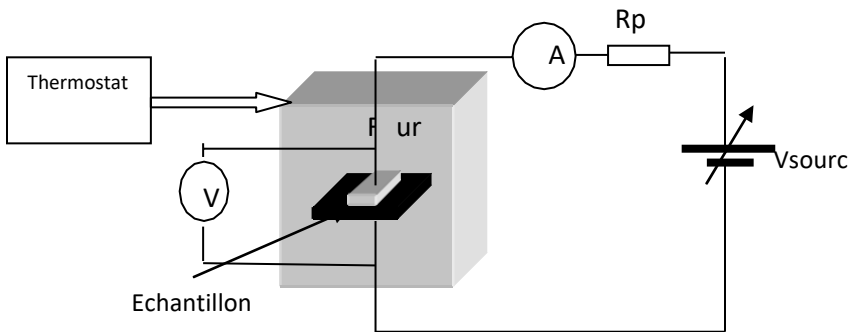


Figure 3 : Synoptique du kit expérimental

IV. Travail demandé

- 1) Introduire l'échantillon dans le four en respectant la polarité (polarisation directe).
- 2) Compléter les tableaux pour des températures fixes.

T1= température ambiante (20à25°C)

V _{source} (V)	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	3	5	8	10	11	12
Vd (V)												
Id (mA)												

T2=.....°C

V _{source} (V)	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	3	5	8	10	11	12
Vd (V)												
Id (mA)												

- 1) Refaire les mesures pour plusieurs températures (4 à 5), les températures sont changeables et réglables à l'aide du potentiomètre thermostat.
- 3) Dans un même graphe tracer l'allure de I=f(V) pour l'ensemble des températures.
- 4) Déterminer $\frac{dV}{dT}$ comparer la valeur mesurée avec la valeur théorique.
- 5) Conclusions.

TP5

Effet Hall

I. But

Ce travail permet la détermination des caractéristiques électriques d'un semiconducteur par utilisation de l'effet Hall telles que:

- La détermination de la tension et de la résistance Hall d'un semiconducteur,
- la détermination de la mobilité du semiconducteur,
- le Calcul de la concentration du semiconducteur.

II. Rappel théorique

Principe de l'effet Hall

Si un courant I parcourt une plaque conductrice ou semiconductrice de section rectangulaire, et si cette plaque est traversée par un champ magnétique B perpendiculaire à sa grande surface et à la direction du courant, une tension appelée tension de Hall apparaît entre les deux côtés de la plaque (phénomène observé par Hall en 1879).

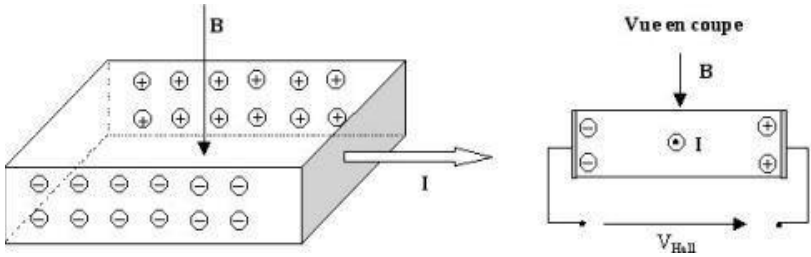


Figure 1 : Effet Hall sur un échantillon de section rectangulaire.

Considérons un semi-conducteur extrinsèque dopé n. Soient (Oz) la direction de B , (Oy) la direction de la largeur de la plaque et (Ox) la direction de sa longueur. On a les relations suivantes :

$$j = -n.e.v = \sigma.E_L$$

où j est la densité de courant, e la charge de l'électron, n leur densité (nombre d'électrons par unité de volume) et $v = \mu_e \cdot E_L$ la vitesse moyenne des porteurs de charge. E_L est le champ électrique longitudinal de la plaque et μ_e est la mobilité des électrons, c'est-à-dire la vitesse moyenne dans la direction du champ et cela pour un champ unité. Le courant traverse la plaque dans le sens des x positifs et par conséquent les électrons dans le sens des x négatifs.

Suite à l'application du champ magnétique B , les électrons sous l'action de la force de Lorentz $F = -ev \wedge B$ vont se déplacer suivant la direction (Oy) et s'accumuler sur la surface du parallélépipède située dans cette direction. Suite au départ des électrons, des charges positives s'accumulent sur la surface opposée. Il y a donc création d'un champ électrique transverse, E_T , qui permet à la force électrique d'équilibrer la force de Lorentz :

$$-e \cdot E_T - e \cdot v \wedge B = 0$$

d'où :
$$E_T = -v \wedge B = \frac{1}{n} \mathbf{j} \wedge B = -\mu_e (E_L \wedge B)$$

Le champ électrique s'écrit : $E = (E_L, E_T, 0) = (E_x, E_y, 0)$, le champ magnétique $B = (0, 0, B_z)$, et la densité de courant $\mathbf{j} = (j_x, 0, 0)$.

En utilisant les composantes des vecteurs, il vient :

$$E_y = -\mu_e \frac{j_x B_z}{n} = -\frac{1}{n e} j_x B_z$$

Le coefficient de Hall, R_H , est alors défini par le rapport :

$$R_H = \frac{E_y}{j_x B_z} = -\frac{1}{n e}$$

Si l est la largeur de la plaque et d son épaisseur, on a :

$$I = j_x \cdot d \cdot l$$

et

$$V_H = l E_y$$

Le coefficient de Hall peut donc s'exprimer d'une façon générale en fonction des grandeurs facilement mesurables :

$$R_H = \frac{V_H d}{I B_z}$$

La mobilité Hall des charges est quant à elle donnée par :

$$\mu_H = R_H \cdot \sigma_0$$

III. Travail pratique

III.1 Matériel

- Module porte échantillon.
- Echantillon en silicium de forme rectangulaire sur lequel est déposé des contacts en or ($E_g=1.12\text{eV}$).
- Générateur de champ magnétique (ensemble de deux bobines reliées par un entrefer).
- Source de tension pour alimentation des bobines.
- Source de tension DC pour générer un courant dans le semiconducteur.
- Teslamètre.
- Sonde Hall tangentielle.
- Voltmètre.
- Ampèremètre.
- Tripode pour fixation de la sonde et le module.
- Fils de connections.

L'image de la figure 2 montre le dispositif expérimental

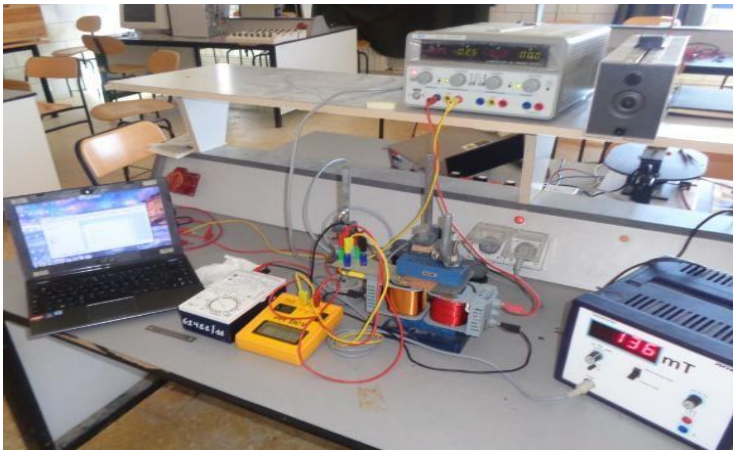
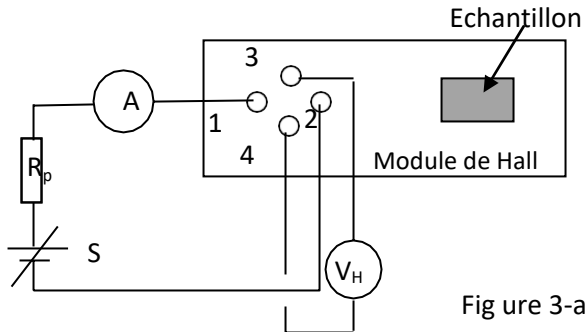


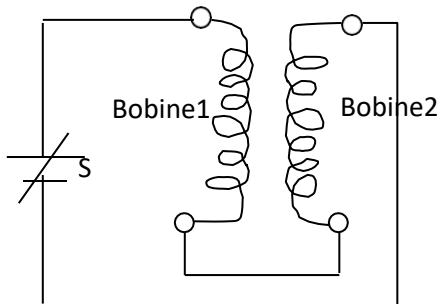
Figure 2. Image du kit expérimental de l'effet Hall

III.2 Travail demandé

- 1) Faire le câblage des figures 3a et 3b
 - Câblage du module de Hall qui porte l'échantillon



- Câblage de la source du champ magnétique



Le montage global est celui de la figure 2. La sonde de qui mesure le champ magnétique doit être relié au Teslametre.

NB

- Le changement de signe du champ magnétique (champ négatif ou positif) se fait par inversion de la polarisation au niveau de la source (S) de tension qui alimente les deux bobines.
- Le changement du sens de courant dans l'échantillon se fait lui aussi par inversion de la polarité au niveau de la source de tension qui alimente l'échantillon.
- N'oublier pas d'inverser la polarisation de l'ampèremètre dans le cas de changement de signe de courant.
- Avant de faire un changement de polarisation de la tension que se soit pour le module ou les bobine il faut remettre les tensions des alimentations à zero (0Volt).

2) Variation de $V=f(I)$ pour un champ nul ($B=0T$) :

- Brancher le voltmètre aux bornes de (1 et 2) au niveau du module porte échantillon (figure 3a), pour un champ magnétique nul, varier le courant I de la source, et enregistrer à chaque valeur l'indication du voltmètre. Compléter le tableau ci-dessous.

I (mA)	0	1	2	4	6	8	10	15	20	25	30
V											

- Tracer la courbe $I(V)$, commenter le résultat obtenu.

3) Variation de $V_H=f(I)$ pour $B=$ constant :

- Brancher le voltmètre aux bornes 3 et 4 (figure 3 a), faire varier le courant de la source et compléter le tableau ci-dessous pour $B=0T$ puis pour $B=172mT$.

I (mA)	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
V _H (mV)													

- Tracer les courbes $V_H=f(I)$, comparer les deux courbes. Dédire le facteur de proportionnalité α entre V_H et I puis établir la relation entre la tension Hall et le courant qui traverse l'échantillon.

4) Variation de $V=f(B)$ pour I constant :

Pour $I=20\text{mA}$ puis pour $I=30\text{mA}$, compléter le tableau ci-dessous :

B (mT)	250	200	180	150	125	100	75	50	0
V _H (mV)									

Tracer les courbes $V_H=f(B)$ pour les deux cas de I . Etablir la loi linéaire de $V_H=f(B)$.

En se basant sur la relation de R_H (partie théorique) et les dimensions de l'échantillon, calculer la résistance de Hall R_H .

5) La conductivité σ_0 est obtenue par la relation : $\sigma_0 = \frac{l}{R.A}$

avec l la longueur de l'échantillon, A la surface et R la résistance de l'échantillon on déterminant les dimensions de l'échantillon utilisé, calculer σ_0 et déduire la mobilité μ_H .

NB

Les dimensions des échantillons utilisés sont mesurées par les outils de mesures : Pied à coulisse et le Balmer

TP6

Effet Zener

I. But

- Chercher les caractéristiques statiques de la diode Zener pour les deux cas de polarisations ; directe et inverse.
- Effet Zener.
- Tension Zener.
- Effet de la nature du matériau et de son dopage sur la tension Zener.

II. Bases théoriques

II.1 Définition

Une diode Zener est un assemblage de deux semiconducteurs dont les propriétés électriques ont été découvertes par le physicien américain Clarence Zener. Contrairement à une diode conventionnelle qui ne laisse passer le courant électrique que dans un seul sens, le sens direct, les diodes Zener sont conçues de façon à laisser également passer le courant inverse, mais ceci uniquement si la tension à ses bornes est plus élevée que le seuil de l'effet d'avalanche. Ce seuil en tension inverse (tension Zener) est de valeur déterminée pouvant aller de 1,2 V à plusieurs centaines de volts.

Une diode Zener est une conséquence de la polarisation inverse d'une diode simple (jonction PN) et qui donne un effet dit Zener.

L'objectif primordial de la diode Zener est de stabiliser les tensions continues à une tension fixe nommée tension Zener.

II.2 Symboles :

La diode Zener est symbolisée comme suit (figure 1) :

- Symbole électrique d'une diode
- Symbole technologique
-

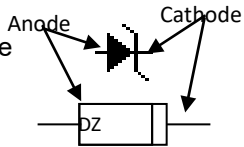


Figure 1 : Symbole de la jonction PN

II.3 Polarisation de la diode Zener

Une diode Zener peut être polarisée directement ou inversement. Une polarisation en directe où l'anode est à la borne positive de la tension d'entrée, la cathode à la borne négative de la tension V_e . (figure 2).

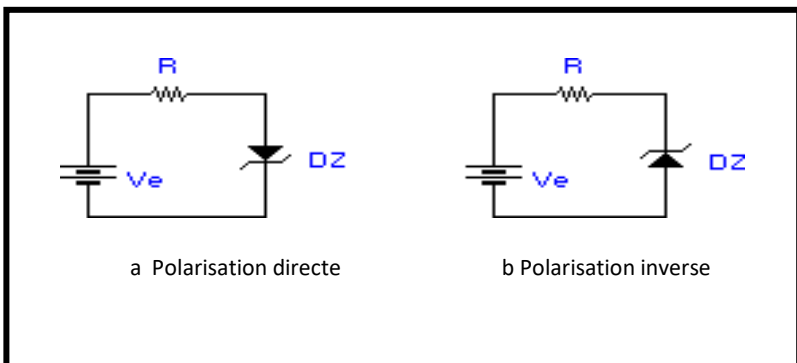


Figure 2 : Schéma électrique de la polarisation directe et inverse d'une diode Zener

II.4 Caractéristiques courant-tension

La figure (3) montre l'allure du courant en fonction de la tension aux bornes de la diode Zener. Dans le cas de la polarisation directe la diode fonctionne en mode normal comme une simple diode, par contre si la polarisation est en inverse, on remarque que la tension est presque constante et indépendante du courant. Cette caractéristique explique l'effet Zener.

V_z est une tension seuil dans la polarisation inverse. Elle est appelée tension Zener, sa valeur est fixée par le constructeur. Si par exemple cette tension est fixée à 1V ; donc $V_z = 1V$.

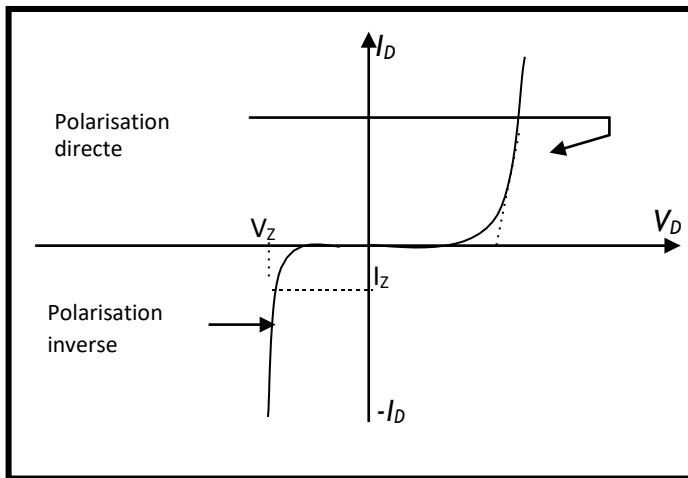


Figure 3 : Caractéristiques courant-tension $I(V)$ d'une diode Zener

III. Travail demandé

III.1 Polarisation directe

On dispose de 3 diodes Zener différentes, les mesures seront faites pour chaque diode

- 1) Réaliser le montage de la figure (1-a) avec l'insertion d'un ampèremètre en série avec la résistance R de protection et un voltmètre en parallèle à la diode D_z (à choisir) pour relever la caractéristique courant-tension aux bornes de la diode. V_e est un générateur de tension variable.

Pour chaque diode, varier graduellement la tension d'entrée compléter le tableau ci-dessous.

V_e (V)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	2	5	10	20	30	50	80	100	140	160
I (mA)															
V_{Dz} (V)															

- 2) Tracer sur un même graphe les fonctions et $I = f(V_{Dz})$ pour le cas direct pour l'ensemble des diodes.
- 3) Comparer le résultat théorique avec ce résultat expérimental.
- 4) Conclusion 1 : déduction des différences existantes entre les 3 diodes et les éléments responsables de l'ensemble des différences observées.

III.2 Polarisation inverse

- 1) Réaliser le montage de la figure (1-b) avec l'insertion d'un ampèremètre en série avec la résistance R et d'un voltmètre en parallèle à la diode D_z .

- 2) Varier graduellement la tension d'entrée et compléter pour chaque valeur V_e , le tableau ci-dessous : (même travail pour chaque diode).

V_e (V)	0	-10	-15	-20	-30	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160	-180
I (mA)													
V_{DZ} (V)													

- 3) Tracer sur un même graphe les fonctions et $I = f(V_{DZ})$ pour le cas inverse pour l'ensemble des diodes.
- 4) Conclusion2 : déduction des différences existantes entre les 3 diodes et les éléments responsables de l'ensemble des différences observées.
- 5) Déduire V_z pour chaque diode.
- 6) Expliquez théoriquement comment varier la tension V_z pour chaque Zener.

Annexe 1

Aide sur l'utilisation du logiciel ORIGIN

I. Introduction

Origin est un logiciel de traitement et d'analyse de données scientifiques pour environnement Microsoft Windows développé par OriginLab. Il permet notamment de tracer des courbes, des graphes 2D et 3D et possède des fonctions d'analyse et d'interpolation. Il est aussi capable d'importer des fichiers de divers formats tels que Excel, ASCII, Mathematica ou SigmaPlot, et d'exporter les graphes sous format JPEG, GIF, Tiff etc.

A ce niveau, nous nous limitons à quelques applications

La version disponible choisie et disponible c'est origin 6.1, son utilisation est facile.

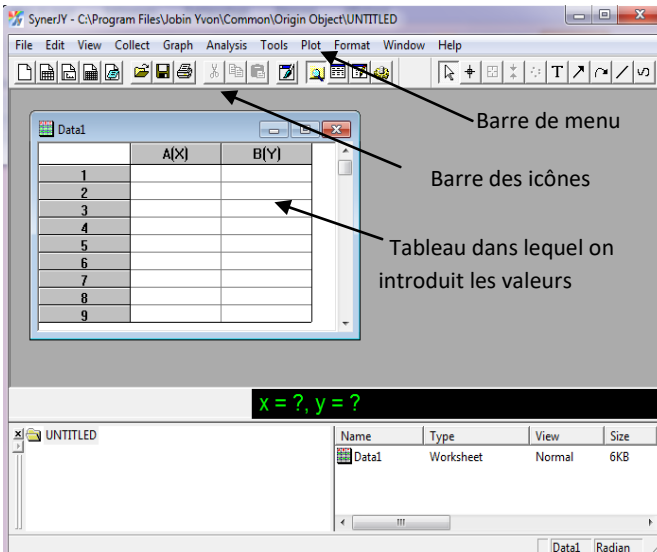
II. Aide sur l'utilisation

Dans ce paragraphe, nous essayons de donner le maximum d'aide utile et nécessaire pour le bon déroulement des travaux pratiques. Il est impossible de présenter tout le help sur Origin.

Nous essayons de présenter les points suivants :

- Premier contact avec Origin ;
- remplir un tableau de valeurs ;
- tracer des graphes ;
- tracer plusieurs courbes sur un même repère ;
- analyser (Fit) des courbes ;
- copier un graphe sur une page Word.

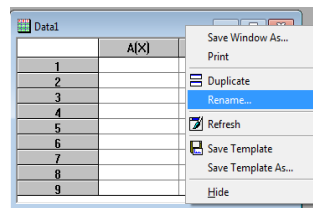
A l'ouverture du logiciel Origin 6.1 après installation, une interface apparaît (image ci-dessous)



- Sur le tableau on fait introduire les valeurs des mesures. Le nom du tableau est nommé par défaut **Data1**.
- On peut ajouter un autre tableau en cliquant juste sur l'icône qui se trouve dans la barre des icônes.



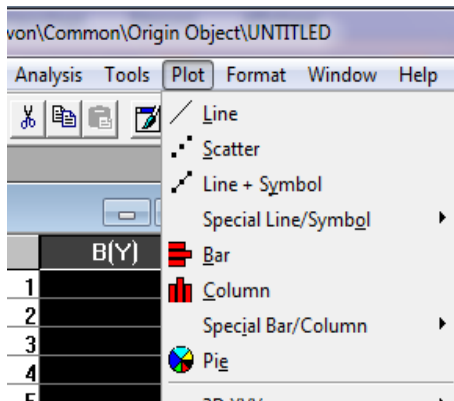
- Pour nommer le tableau il suffit de cliquer à droite la souris, une fenêtre apparaît sur laquelle est indiquée **Rename**, faire un clic une boîte de dialogue apparaît vous pouvez après donner un nouveau nom.



- Après introduction des valeurs (Origin considère par défaut la première colonne comme axe des abscisses et la seconde colonne comme axe des ordonnées.
- Pour le plot (tracer la courbe), En sélectionne la colonne B(Y) pour indiquer que c'est bien l'axe des y. après on clique sur Plot de la barre de menu (voir interface principale).

	A(X)	B(Y)
1	1	2
2	2	4
3	3	6
4	4	8
5	5	10
6		
7		
8		
9		

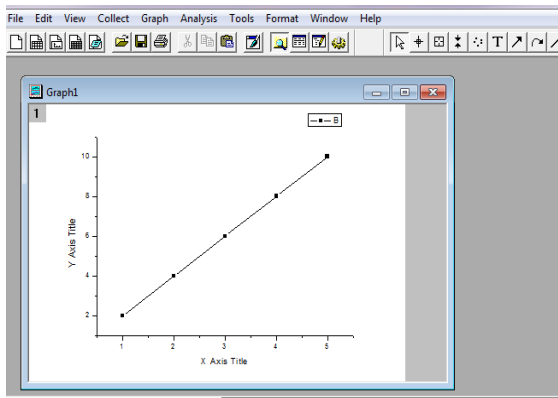
- Une fenêtre s'ouvre où il y a toute une série de choix des styles des courbes:



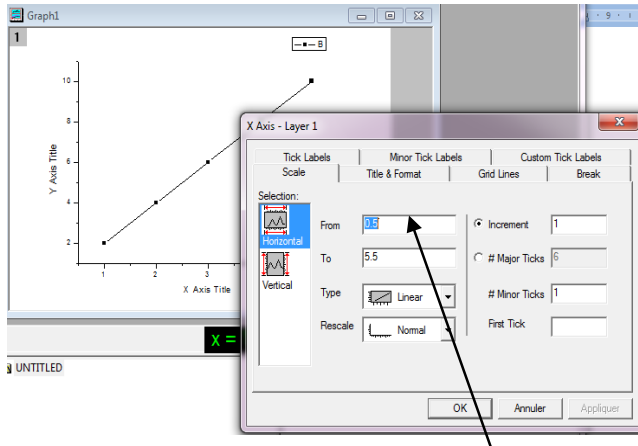
- **Line** indique que la courbe est continue;
- **Scatter** indique que la courbe est présentée par des points seulement;
- **Line + Scatter** indique que la courbe est l'ensemble des points reliés entre eux

En se limite à ces trois formes.

- Après le choix d'un modèle de courbe (exemple **line+Scatter**) un graphe nommé par défaut Graph1 apparait automatiquement.




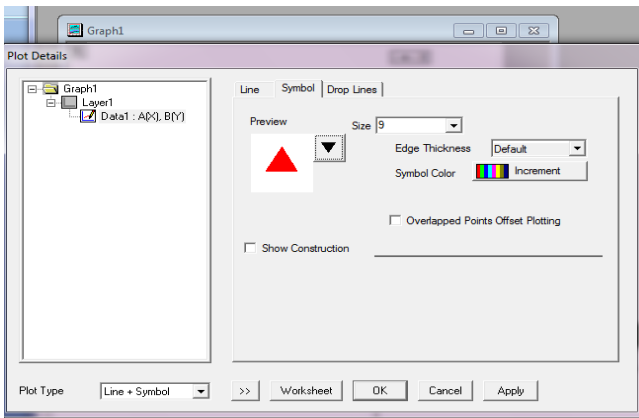
- Sur ce graphe on peut faire des modifications comme par exemple:
 - Donner des titres aux axes x et y. faire un double clique sur **X Axis Title** ou sur **Y Axis Title**.
 - Changer l'échelle des axes par double clique sur l'axe lui-même (soit x ou y), une boite de dialogue apparait sur laquelle vous pouvez faire les changements voulus.



X commence de 0.5
et termine à 5.5
Ces valeurs sont
modifiables

Les mêmes modifications peuvent être réalisées pour l'axe des Y, il suffit simplement cliquer sur l'icône **Vertical** si la boîte de dialogue est ouverte ou bien de cliquer sur l'axe des Y. cliquer sur **OK** après les modifications.

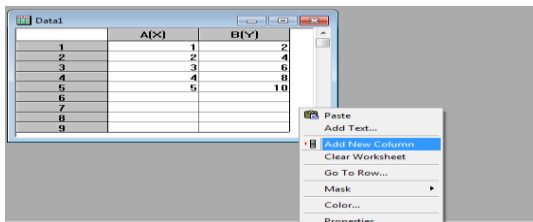
- Ajouter un texte sur le graphe par simple clique sur l'icône  da barre des icônes.
- Changer la forme et la couleur des points de la courbe par un double clique sur le point lui-même, une boîte de dialogue apparait où vous pouvez faire les changements voulus. Amuser vous avec cette boîte et voir les changements possibles et c'est à vous de découvrir.

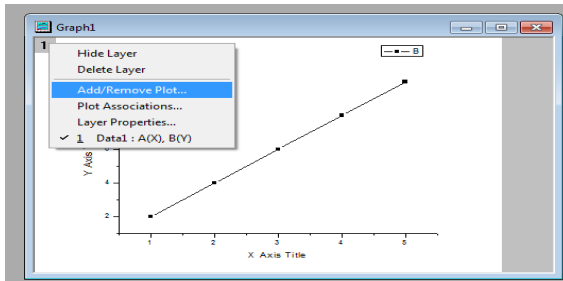


Tracé de plusieurs courbes dans un même graphe

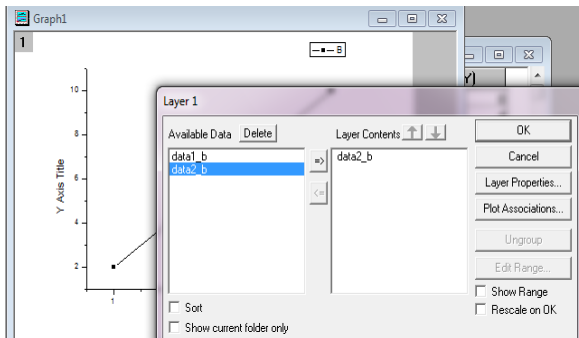
Dans des cas, il est important de tracer plusieurs courbes dans un même graphe pour voir la différence par exemple. Il y a deux cas possible:

- Cas où l'ensemble des courbes ont la même abscisse: Dans ce cas on peut ajouter à notre tableau plusieurs colonnes en cliquant à gauche sur la souris prêt du tableau, et une fenêtre apparait sur laquelle est indiquée **Add New Column**. Pour tracer l'ensemble des courbes il suffit de sélectionner toutes les colonnes choisies pour Y et faire ensuite le plot.
- Cas où l'ensemble des courbes n'ont pas la même abscisse: dans ce cas introduit les valeurs de chaque courbe dans un tableau propre à elle, puis on fait le plot de l'une des courbes.





Sur la partie supérieure de la fenêtre du graphe une petite icône en gris sur laquelle est affichée un numéro. Sur cette icône on réalise un clique à droite de la souris et une fenêtre apparaît sur laquelle est indiquée **Add/remove Plot**. Cliquer sur cette instruction et une boîte de dialogue s'ouvre dont le titre est **Layer 1**. sélectionner **data2_b** puis l'ajouter à **LayerContents** par simple clique sur le bouton =>, puis **OK**.

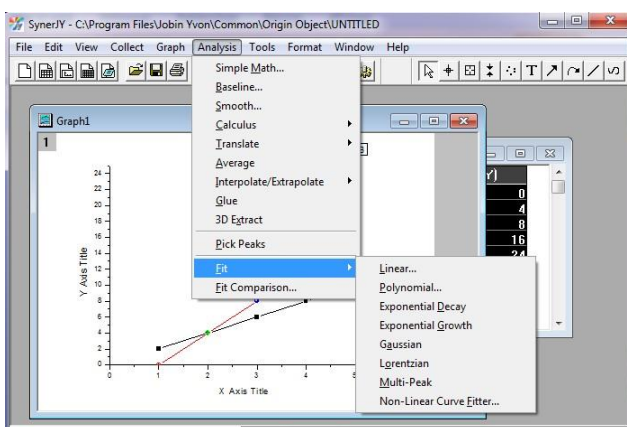


Le résultat est l'ensemble des courbes dans un même graphe.

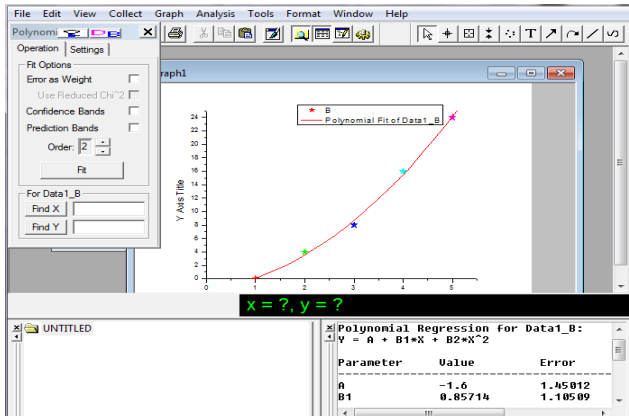
	A(X)	B(Y)
1	1	2
2	2	4
3	3	6
4	4	8
5	5	10
6		
7		
8		
9		

Analyse d'une courbe

Origin offre la possibilité d'analyser les profils obtenus par régression ou par interpolation (c'est le fit des courbes). Pour ce faire cliquer sur **Analysis** de la barre de menu, une fenêtre s'ouvre; plusieurs possibilités apparaissent dont **Fit** fait partie. Cliquer sur fit, on trouve plusieurs formes de fit: **lineaire, polynomial,...**il suffit de choisir le bon fit selon l'allure observée.

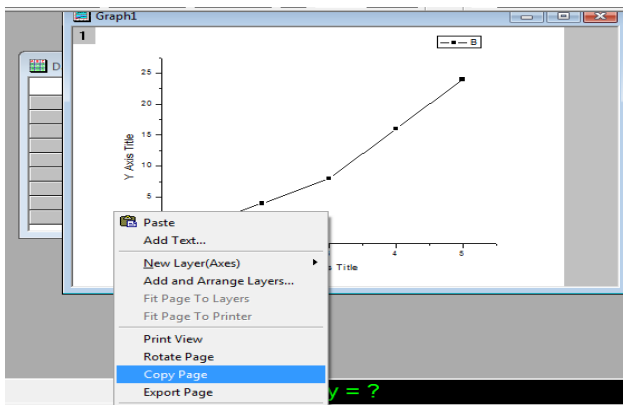


Comme exemple d'aide; Soit la courbe représentée par les étoiles (figure ci-dessous), on faisant un fit polynomial, une fenêtre montre l'ordre du fit, dans ce cas nous choisissons l'ordre 2 car les points peuvent donner un polynôme du second degré. Le résultat trace le profil de notre fit, en bas Origin donne les paramètres du fit: la fonction mathématique, les coefficients A, B1 avec les erreurs d'approximation (figure ci-dessous). Un bon fit si R le résidu tend vers ± 1



Copie de graphe dans Word

Origin offre la possibilité d'exporter les graphes dans word. La procédure est simple, il suffit de cliquer (coté droit de la souris) dans le coté inferieur de la page ou se trouve la graphe (la position sur laquelle apparait la fenêtre de choix (voir figure ci-dessous)). Cliquer sur **Copy page**, puis dans la page word tapé l'instruction **Coller** ou **Ctrl V**. la coure est sur la page du texte word.



Annexe 2

Certificat Wafers Silicium

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques des wafers de silicium utilisés dans les expériences :

	unité	Wafer 1 (6D)	Wafer 2 (9U)	Wafer 3 (9B)	Wafer 4 (7T)	Wafer 5 (7R)	Wafer 6 (9R)
Mode d'élaboration		FZ	CZ	CZ	CZ	CZ	CZ
Type		N	P	P	N	N	N
Dopant		P	B	B	P	P	P
Résistivité	Ω .cm	60-110	3-10	0,4- 0,5	1-30	1,3- 1,8	19-35
Diamètre	mm	50,8±0.3	50,8±0.3	50,8± 0.3	50,8± 0.3	50,8± 0.3	50,8± 0.3
Épaisseur	μ m	200± 25	200± 25	300± 25	280± 25	280± 25	300± 25
Orientation		100	100	100	100	100	100
Face		poli	poli	poli	poli	poli	poli
Face		N poli	poli	N poli	N poli	N poli	N poli
EPd		<100	<100	<100	<100	<100	<100

Annexe 3

Oxyde d'indium-étain ITO

L'oxyde d'indium-étain (ou oxyde d'indium dopé à l'étain ou ITO pour l'appellation anglaise : Indium tin oxide) est un mélange d'oxyde d'indium(III) (In_2O_3) et d'oxyde d'étain (IV) (SnO_2), dans la proportion massique typique de 90 % du premier et 10 % du second. Ce composé est incolore et transparent en couches minces, de jaunâtre à gris sous forme massique.

La caractéristique principale de l'oxyde d'indium-étain est sa combinaison de conductivité électrique et de transparence optique. Cependant, un compromis doit être atteint lors du dépôt de films, l'augmentation de la concentration de porteurs de charges induisant une hausse de conductivité du matériau, mais une perte de sa transparence.

Les couches minces d'ITO sont le plus souvent déposées sur des surfaces par évaporation par faisceau d'électrons, dépôt physique par phase vapeur ou autres techniques de dépôt par vaporisation.

- L'ITO est caractérisé par une faible résistivité, qui peut atteindre $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$
- L'ITO est caractérisé par une large bande interdite, directe, qui varié entre 3,5- 4,3eV