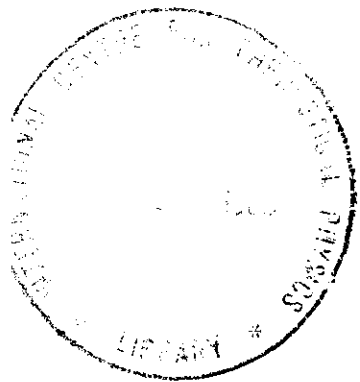




INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION



INTERNATIONAL CENTRE FOR THEORETICAL PHYSICS
34100 TRIESTE (ITALY) - P.O.B. 586 - MIRAMARE - STRADA COSTIERA 11 - TELEPHONE: 2240-1
CABLE: CENTRATOM - TELEX 460892 - I

W4.SMR/193 - 53

"COLLOQUE INTERNATIONAL SUR LA SCIENCE DES MATERIAUX POUR L'ENERGIE".
(26 août - 11 septembre 1986).

"ETUDE DES PARAMETRES PHYSIQUES QUI INTERVIENNENT DANS LE RENDEMENT
DES PHOTOPILES".

Michel Averous
Université des Sciences et Techniques
du Languedoc
Montpellier, France

Ces notes de recherche provisoires, sont destinées aux participants. Eventuellement, d'autres copies seront disponibles au bureau 231.

Étude des paramètres physiques qui interviennent dans le rendement des photopiles

Dans la conférence sur les rendements un certain nombre de paramètres physiques sont intervenus; ils sont caractéristiques des matériaux employés et des dopage de ces matériaux. Ils sont soit des paramètres électriques, soit des paramètres optiques. Au cours de cette conférence nous allons étudier ces paramètres.

Paramètres Électriques

I - Conductivité du semi-conducteur et mobilité des porteurs

L'un des paramètres électriques fondamentaux d'un semi-conducteur est sa conductivité (exprimée en $\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$) qui est généralement exprimée sous la forme

$$\sigma = q(n\mu_e + p\mu_h)$$

Où n est la concentration d'électron libre $/\text{cm}^3$

p = la concentration de trous
 q la charge de l'électron, constant
 μ_e = la mobilité électronique, $\text{cm}^2 \text{volt}^{-1} \text{sec}^{-1}$
 μ_h = — — — — — trous
 L'inverse de la conductivité est la résistivité $\rho = 1/\sigma$
 c'est cette grandeur qui est mesurée.

La mobilité des porteurs de charge dans un semi-conducteur est limitée principalement par la diffusion due aux collisions avec les atomes du réseau et les atomes d'impuretés non ionisés. Aux hautes températures, qui ne sont pas en général la température d'utilisation des photopiles, la diffusion par les impuretés ionisées intervient aussi.

Quand la concentration en impuretés augmente, la mobilité décroît. La Fig 1 le montre pour le silicium.

De même la mobilité des porteurs de charge décroît quand la température augmente parce que les vibrations thermiques des atomes du réseau augmentent, ce qui entraîne une diffusion des porteurs plus intense.

En général la variation de la mobilité avec T est donnée par une loi de la forme

$$\mu = C T^{-\alpha}$$

Où α est caractéristique des processus de diffusion des électrons et des trous. Pour Si

$$C_e = 4.0 \quad \alpha_e = 2.6$$

$$C_h = 2.5 \quad \alpha_h = 2.3$$

lorsque la concentration en porteurs, la conductivité du SC n'est pas directement proportionnelle à la concentration de porteurs.

les fig ci dessous représentent la variation de la résistivité ou de la conductivité en fonction de la concentration

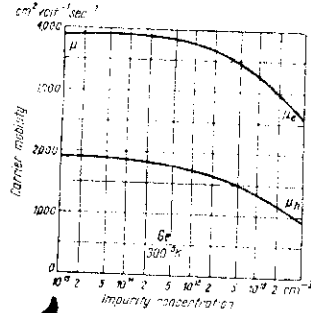


Fig. 1 Mobilities of electrons μ_e and holes μ_h in germanium versus the impurity concentration (after Prince)

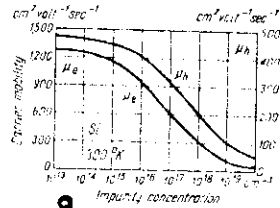
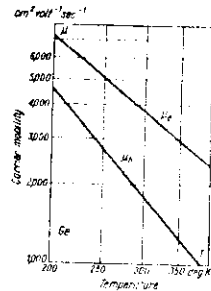


Fig. 2 Mobilities of electrons μ_e and holes μ_h in silicon versus the impurity concentration (after Conwell)



Mobilities of electrons μ_e and holes μ_h in germanium versus temperature (after Prince)

Fig 3

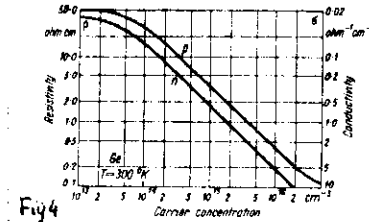


Fig. 4 Conductivity σ and resistivity ρ of p-type and n-type germanium versus carrier concentration (after Prince)

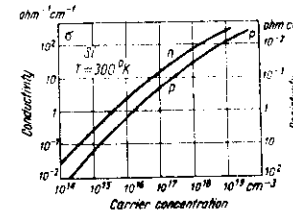


Fig. 5 Conductivity σ and resistivity ρ of p-type and n-type silicon versus carrier concentration

Compensation : un facteur important dans la détermination de ρ est la compensation. En pratique il s'agit de matériaux où l'on a, à la fois des donneurs et des accepteurs. La résistivité sera comme si l'on avait un seul type d'impureté qui ait la différence des deux.

Ex Ge avec $N_D = 2.7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
et $N_A = 9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
Il donne une conductivité de type n et une résistivité correspondant à une concentration de donneurs égale à $N_D - N_A$. Il est donc possible d'obtenir

des matériaux avec une concentration et un impureté impure, une grande sensibilité, proche de celle d'un matériau intrinsèque. En dépit de leur haute sensibilité, leur grand nombre d'impuretés agit comme des centres recombinaisons, de telle sorte que les porteurs ont des mobilités très basses et des durées de vie faibles. Dans de tel matériau ne sont pas bons pour les photo piles

II - Courant de diffusion et Courant de drift

Quand on considère l'écoulement d'un courant électrique dans un semiconducteur, l'on doit tenir compte de deux types de courant.

Dans un semiconducteur homogène (concentration constante) la densité de courant est proportionnelle à l'intensité du champ électrique appliqué.

$$j = \sigma E = q n \mu E$$

ce courant est le courant de drift.

Si la concentration varie, un courant électrique est produit, même sans champ externe. C'est le courant de diffusion. Il est proportionnel au gradient de concentration.

$$j_d = q D \frac{dn}{dx}$$

pour les électrons (gradient de densité)

ou D est la constante de diffusion. Dans les électrons se déplacent vers les faibles

concentrations, le courant est diffusion, haute concentration plus élevée.

Pour les trous, le mouvement et le courant de diffusion ont la même direction

$$j_h = -q D_h \frac{dp}{dx}$$

trous (Accepteurs).

les constantes de diffusion pour les électrons et les trous ($\text{cm}^2 \text{sec}^{-1}$) sont reliées à la mobilité par la relation d'Einstein

$$D = \mu \frac{kT}{q}$$

Dans en présence de gradient de concentration d'impuretés et de champ électrique, le courant total est la somme des 2 courants: courant de Drift et courant de diffusion

III - Durée de vie - Recombinaison des porteurs - Durée de vie et longueur de diffusion dans les semiconducteurs

les porteurs de charge peuvent être générés soit à partir des atomes du cristal (BV - BC) soit à partir d'atomes d'impuretés (σ - par exemple), Trous par accepteurs. Il y a un échange permanent d'énergie, de cette façon, entre les at.

la capture des porteurs libres par les atomes, c.-à-d. le processus inverse à la création de porteurs est appelé recombinaison. Un électron libre ou un trou peut se recombinaison de deux façons: soit une recombinaison directe BC-BV soit une recombinaison indirecte via les états intermédiaires dans le gap ~~intermédiaires~~

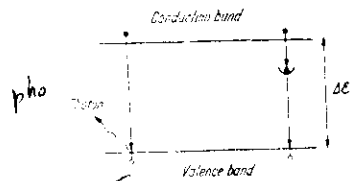


Fig. 6 Two mechanisms of electron-hole pair recombination in a semiconductor: direct recombination (on left) and recombination via trapping levels (on right).

Recombinaison

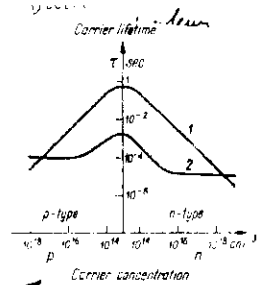


Fig. 7 Carrier lifetime in p-type and n-type germanium versus carrier concentration: 1 for direct recombination, 2 for recombination via trapping levels.

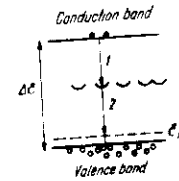


Fig. 8 The recombination of electron-hole pairs in a heavily-doped p-type semiconductor: 1 first phase of recombination limiting the recombination rate; 2 final phase of recombination.

Dans le cas de la recombinaison des porteurs via les pièges, la concentration de porteurs en excès en fonction du temps suit une loi linéaire de décroissance

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau_e}$$

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\Delta p}{\tau_h}$$

où Δn et Δp sont les concentrations en excès des électrons libres et trous libres par rapport aux concentrations à l'équilibre thermique, et τ_e et τ_h sont respectivement les durées de vie de e^- et des trous.

la durée de vie des porteurs libres dans un sc est un paramètre important puisqu'il détermine la longueur moyenne à laquelle les porteurs peuvent diffuser à partir du point où ils sont créés (important pour atteindre la jonction). Cette distance est appelée la longueur de diffusion et dépend de la durée de vie

$$L_e = \sqrt{\tau_e D_e}$$

$$L_h = \sqrt{\tau_h D_h}$$

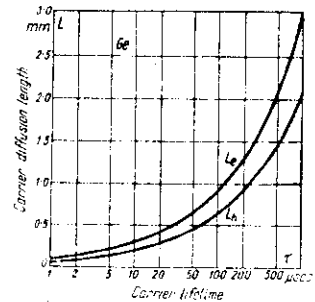


Fig. 10 Diffusion length L_e of electrons and L_h of holes in germanium.

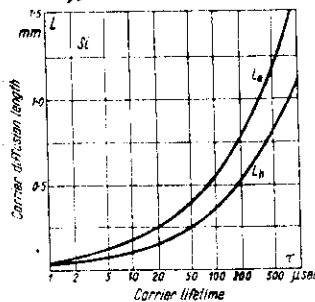


Fig. 11 Diffusion length L_e of electrons and L_h of holes in silicon.

Recombinaison directe → Dans ce cas les calculs montrent que la probabilité pour que l' e^- et le trou se rapproche à une distance suffisamment faible pour que la recombinaison se produise donne une durée de vie de ce mécanisme de l'ordre de 10^{-10} s. En pratique, la durée de vie observée sera plusieurs fois plus faible. Le processus dominant de recombinaison se fait par l'intermédiaire de niveaux pièges au moins jusqu'à des concentrations de l'ordre de 10^{17} .

Expliquer le cas des niveaux profonds

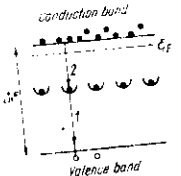


Fig. 8 The recombination of electron-hole pairs in a heavily-doped n-type semiconductor: 1 first phase of pair recombination limiting the recombination rate; 2 the final phase of recombination.

Donneurs profonds. Tous les cas E_T au-dessus de la phase $1e^-$ des donneurs vers le trou sont libres 2^e phase

Dans quel une paire électron trou est capturée le premier. la durée de vie des trous est inversement proportionnelle à la concentration des niveaux profonds. la durée de la température.

IV - Recombinaisons en surface

Si une faible concentration en excès de porteurs de charge libres s'élève à la surface du semiconducteur, le nombre de porteurs se recombinaut / unité de temps / unité de surface est proportionnel à la concentration de porteurs en excès à la surface Δn_{sp} . Le facteur de proportionnalité est la vitesse de recombinaison en surface (en s^{-1})

Dans le cas d'une surface libre, sans électrode, le courant de surface doit être égal à zéro. Cependant un nombre égal d'électrons et de trous peuvent atteindre la surface à partir du volume et se recombiner en surface. Le nombre d' e^- se recombinant / unité de surface / unité de temps $S \Delta n_{sp}$ est égal au nombre d'électrons arrivant à la surface du SC / unité de surface / unité de temps i_n / q où i_n est la composante de la densité de courant d'électrons normale à la surface.

$$\frac{i_n}{q} = S \Delta n_{sp}$$

la direction $z > 0$ est prise à l'opposé de la direction du mouvement des électrons vers la surface.

Dans de nombreux cas (photo) les radiations créent des paires électron-trous dans la couche

Equation de Continuité:

la concentration de porteurs dans une région et une SC peut augmenter à cause des créations induites par la lumière ou à cause de porteurs venant des

régions voisines mais aussi par le départ des porteurs par diffusion ou sous l'influence d'un champ électrique. Conséquence cet effet quant à l'équilibre.

Soit une couche SC d'épaisseur d et de section 1 cm^2 le volume est donc la concentration en e^- est $n(x, t)$ le nombre total d' e^- est $n(x, t) d$

une variation d' e^- pendant le temps dt peut s'écrire:

$$[n(x, t+dt) - n(x, t)] dx = \frac{\partial n}{\partial t} dx dt$$

Cette variation provient des processus suivants:

a) pendant le temps dt , la radiation crée $g dt dx$ électrons.

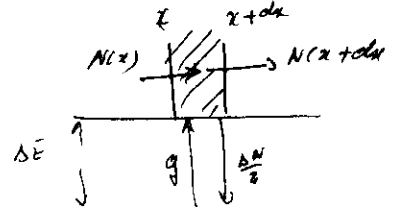
b) la variation due aux recombinaisons est $-(S \Delta n / d) dx dt$

c) $N(x, t) dt$ électrons entrent dans la région à travers la frontière définie par le plan x pendant le temps dt

$N(x, t)$ est le flux d' e^- (en $e^- \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) entrant dans la région dans le sens des x

Pendant le même temps il en sort $N(x+dx, t) dt$ la différence est

$$[N(x) - N(x+dx)] dt = - \frac{\partial N}{\partial x} dx dt$$



la variation totale du nombre d'électrons dans un volume ΔV donné en tenant compte des trois processus sera

$$\frac{\partial n}{\partial t} \Delta V dt = (g - \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{\Delta n}{\delta}) \Delta V dt$$

d'où nous obtenons

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g - \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{\Delta n}{\delta}$$

le flux d'électrons peut être exprimé comme $N_e = -\frac{ie}{q}$, la densité de courant étant la somme des densités de courant de drift et de diffusion.

Dans $\boxed{\frac{\partial n}{\partial t} = g + \frac{1}{q} \frac{\partial ie}{\partial x} - \frac{\Delta n}{\delta}}$

Ceci est l'équation de continuité.

Si n change dans les trois directions

$$\boxed{\frac{\partial n}{\partial t} = g + \frac{1}{q} \text{div } ie - \frac{\Delta n}{\delta}}$$

$$\text{div } ie = \frac{\partial i_x}{\partial x} + \frac{\partial i_y}{\partial y} + \frac{\partial i_z}{\partial z}$$

la densité de courant total, qui dans ce cas a ses trois composantes est égal à:

$$\boxed{ie = q(n\mu_c E + D_c \text{ grad } n)}$$

(de conduction + et de diffusion)

Des équations analogues peuvent être écrites pour les trous

$$\boxed{\frac{\partial p}{\partial t} = g - \frac{1}{q} \text{div } i_h - \frac{\Delta p}{\delta}}$$

A l'état stationnaire la concentration de porteurs ne varie pas et $\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} = 0$.

L'équation de continuité est une équation fondamentale utilisée dans la détermination des caractéristiques de cellules photovoltaïques et sera employée fréquemment par les conférenciers (cadre).

B- Paramètres Optiques En plus des paramètres électriques que nous venons de voir, les cellules photovoltaïques sont caractérisées par certaines propriétés optiques, qui jouent parfois un rôle décisif dans l'effet photovoltaïque. Ces propriétés sont essentiellement: l'absorption, la réflexion et la transmission des radiations en même temps que la dépendance de ces propriétés avec des facteurs, tels que: longueur d'onde de la radiation, température, pente du semi-conducteur, méthode de préparation des surfaces, etc.

lorsque l'on envoie une radiation électromagnétique incidente sur un SC, elle se divise en trois parties: une fraction P_r de la puissance incidente est réfléchi.

- Une fraction P_a est absorbée dans le SC
- Une fraction P_t est transmise

$$\left[\frac{P_r}{P} + \frac{P_a}{P} + \frac{P_t}{P} = 1 \right]$$

conservation de l'énergie.

Cette relation est valable quelle que soit la longueur d'onde.

Dans les cellules photovoltaïques qui convertissent la radiation électromagnétique en électricité, on doit avoir la plus grande fraction possible de l'énergie absorbée.

La Fig ci dessous illustre les processus selon lesquels un photon est absorbé dans un semi-conducteur

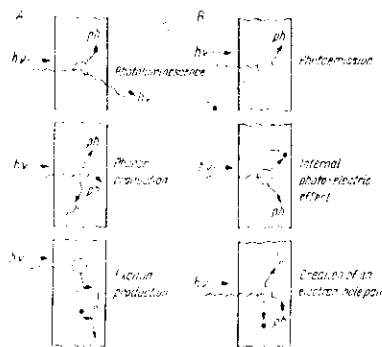


Fig 12

Various types of interaction between photons and a semiconductor crystal lattice.

le groupe B montre les interactions qui existent des porteurs libres. Si l'énergie de l'électron est suffisamment grande, il franchit le potentiel de surface et quitte le cristal : effet photoélectrique externe. B Si l'énergie est insuffisante, et l'e- ne quitte pas le cristal. B2. effet photoélectrique interne.

3. Reflection d'une radiation à la surface d'un SC

le rapport de la puissance réfléchi à la puissance incidente est noté R_λ . Un corps qui aurait un R_λ est un réflecteur idéal.

Pour une radiation incohérente non polarisée, qui est perpendiculaire à la surface du SC l'interface plane entre l'air et le SC d'indice de réfraction n_r la valeur de R_λ est donnée approximativement,

l'expression :
$$R_\lambda = \left(\frac{n_r - 1}{n_r + 1} \right)^2$$

valable pour incidence $> 45^\circ$

Il s'ensuit que l'énergie perdue croît avec l'indice de réfraction du SC.

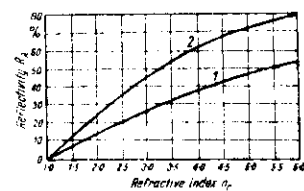


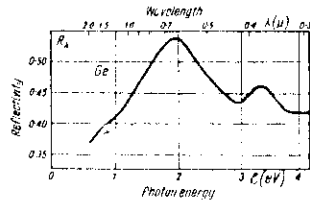
Fig 13

Reflectivity as a function of the refractive index of the material, taking into account reflection: 1 at front surface only, 2 at front and back surfaces, 100.

les SC ont un indice de refraction compris entre 3 et 4 $\Rightarrow$ n_1 voisin de 50% (19)

Dans les cellules photovoltaïques, on utilise des ~~fenêtres~~ Infra-rouges cela réduit dramatiquement le rendement, on a recours à des surfaces de films non réfléchissants qui ont un bon indice de refraction la réflectivité décroît alors de quelques %.

- la réflectivité est aussi une fonction de la longueur d'onde de la radiation incidente, c'est dû d'une part à la dépendance de l'indice de refraction n_r avec la longueur d'onde, d'autre part à la dépendance avec la longueur d'onde des autres paramètres du milieu.



Reflectivity R_A as a function of radiation wavelength for germanium

la réflectivité à la surface non seulement réduit le rendement de la photopile mais c'est aussi une des raisons qui fait que leur sensibilité dépend de la longueur d'onde.

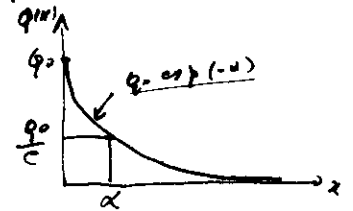
II - Absorption de la radiation par un semi-conducteur.

II.1. Coefficient d'absorption

Sans étudier les différents mécanismes d'absorption, le flux de photons, décroît avec la distance à l'intérieur du SC suivant la loi exponentielle

$$Q(x) = Q_0 \exp(-\alpha x) = Q(1-R_A) \exp(-\alpha x)$$

Q_0 est le flux de photons passant à travers la surface (en photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)
 $Q(x)$ le flux à la profondeur x sous la surface.
 α le coeff d'absorption en cm^{-1}



- le coefficient d'absorption varie pour différents mécanismes d'absorption et c'est une mesure de la décroissance du flux de photon pour un mécanisme d'absorption donné.

II.1. Absorption intrinsèque

Le plus important des mécanismes dans la majorité des semi-conducteurs utilisés en photopile est l'absorption de l'énergie de radiation par les électrons de valence des atomes. Quand les photons sont suffisamment énergétiques, ces

absorption conduit à l'activation d'e- de la bande de valence à la bande de conduction et donc à la génération de paires électrons-trous. Le processus est connu sous le nom d'absorption intrinsèque. L'énergie minimum de photon requise est l'énergie

du gap

Fig 15-16-17-18-19-20

Pour des $E_{photon} < E_g$, le coeff d'absorption intrinsèque est quasi nul, et donc la radiation est transmise par le SC sans atténuation.

Pour $E_{photon} > E_g$ et T très rapidement.

la valeur théorique du coeff d'absorption, calculé par FAN est

$$\alpha = \frac{2q^2 (2m_r)^{3/2} (h\nu - E_g)^2}{3m^2 h^2 c n_r h\nu}$$

$$\text{ou } m_r = \frac{m_e m_h}{m_e + m_h}$$

$p = 3/2$ ou $1/2$ suivant que le gap est direct ou indirect

II.2. Absorption extrinsèque

Si des atomes d'impuretés avec une énergie inférieure au gap sont introduits dans un SC, des photons avec une énergie inférieure au gap sont

-18-

(16.0x)

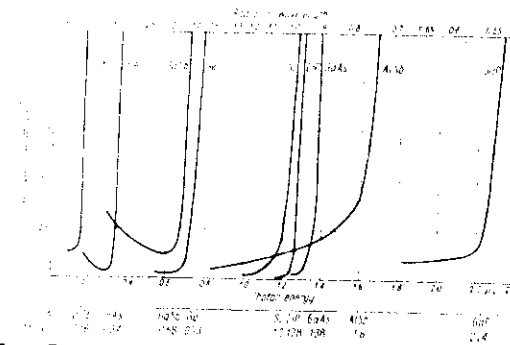


Fig 15 Absorption edge of several semiconductors

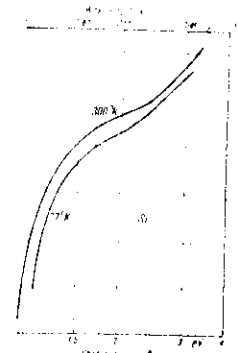


Fig 16 Absorption coefficient versus energy for silicon (after Dash and



Fig 17 Absorption coefficient versus photon energy for indium antimonide

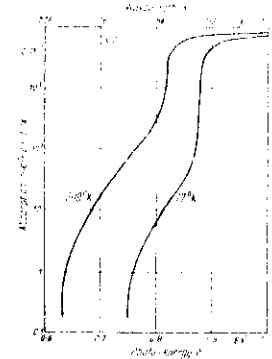


Fig 18 Absorption coefficient versus photon energy for germanium

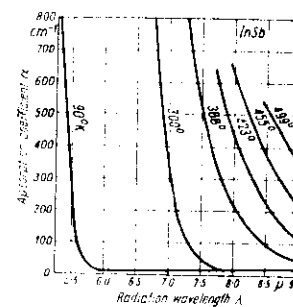


Fig 19 Temperature-dependence of position of absorption edge of indium antimonide

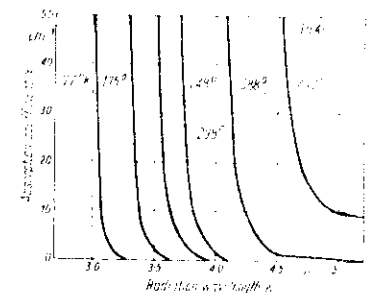


Fig 20 Temperature-dependence of position of absorption edge of indium arsenide

capacité d'exciter des électrons d'un niveau d'impureté dans la bande de conduction, ou de la bande de valence d'un niveau accepteur. L'énergie des photons doit évidemment être supérieure à l'énergie d'activation du niveau.

Dans ce cas le coefficient d'absorption est donné suivant FAN par

$$\alpha = \frac{2^9 \pi N_I h q^2}{3 n_r c m_c \Delta E_I} \left(\frac{\Delta E_I}{h\nu} \right)^4 \frac{\exp \left[-4 \left(1 - \frac{\Delta E_I}{h\nu} \right) \arctan \left(\frac{1 - \frac{\Delta E_I}{h\nu}}{\frac{\Delta E_I}{h\nu}} \right) \right]}{1 - \exp \left[-2 \pi \left(1 - \frac{\Delta E_I}{h\nu} \right) \right]}$$

pour des photons dont l'énergie est voisine de l'énergie d'ionisation du niveau d'impureté ΔE_I , l'expression ci-dessus se simplifie et devient

$$\alpha = 8.3 \times 10^{-17} \frac{m N_I}{m_e n_r \Delta E_I}$$

où m masse de l'électron libre dans le vide

m_c = masse effective de l'e- dans SC.

n_r indice de réfraction

N_I concentration impuretés

ΔE_I énergie d'ionisation de l'impureté.

En substituant dans l'équation ci-dessus les valeurs numériques moyennes dans les semiconducteurs on obtient que le coeff d'absorption due aux impuretés

est de l'ordre de 10^{-17} . Jusqu'à la concentration en impuretés est habituellement dans la gamme 10^{15} à 10^{18} cm^{-3} le coeff d'absorption correspondant est de l'ordre de 2×10^{-20} . Ce processus d'absorption est très important puisqu'il permet d'utiliser une partie du spectre d'énergie solaire qui serait sans cela perdue.

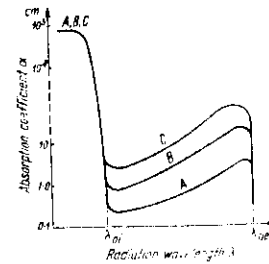


Fig. 24. Wavelength-dependence of absorption coefficient of semiconductors with various concentrations of impurities: A semiconductor with low concentration, C semiconductor with highest impurity concentration.

II-3 Absorption par les porteurs libres

lorsque la T n'est pas gaze, il existe toujours des porteurs libres dans un SC. Les photons de la radiation incidente peuvent interagir avec ces porteurs, la réaction, qui absorbe le photon; leur énergie dans la bande de conduction.

Pour un SC de type n dont σ n'est pas très élevé, de telle sorte que $\sigma \ll \omega \epsilon_0$, le coeff d'absorption due à l'absorption par les porteurs libres est

$$\alpha = \frac{\sigma}{\epsilon_0 c n_r} \left[1 + \left(\frac{\omega \mu m_e}{q} \right)^2 \right]^{-1}$$

ou $\sigma = k$ conductivité en $S \cdot cm^{-1}$ (2)
 $\omega =$ la fréquence angulaire de la radiation en s^{-1}
 ϵ_0 constante diélectrique du vide, 1
 $= 8.86 \cdot 10^{-12}$ constante diélectrique d'un "carré-lin
 space" (en Farad mètre $^{-1}$)
 m_c la masse effective de l'électron
 μ la mobilité

Pour des radiations de fréquence micro-onde, telle que
 la condition $\omega \mu m_c / q \ll 1$ soit remplie, la condition
 d'équation ci dessus se simplifie

$$\alpha = \frac{\sigma}{\epsilon_0 c n_r} = 1635 \frac{\sigma}{n_r}$$

Pour des radiations IR telle que $\frac{\omega \mu m_c}{q} \gg 1$, elle
 devient

$$\alpha = \frac{\sigma q^2}{\epsilon_0 c n_r \mu^2 m_c^2 \omega^2} = \frac{A q^3}{4 \pi^2 c^3 n_r \epsilon_0} \frac{n}{m_c^2 \mu}$$

— Donc l'absorption par les porteurs libres est
 proportionnelle au carré de la longueur d'onde et
 au nombre d'électrons.

la condition $\frac{\omega \mu m_c}{q} \gg 1$ est valable pour des
 nombres SC pour des longueurs d'onde supérieures
 à 1000μ

Si il en a, à la fois des e^- et des trous

$$\alpha = \frac{A q^3}{4 \pi^2 c^3 n_r \epsilon_0} \left(\frac{n}{m_c^2 \mu_c} + \frac{p}{m_v^2 \mu_h} \right)$$

Pour modifier α , on peut jouer à la fois sur n et p

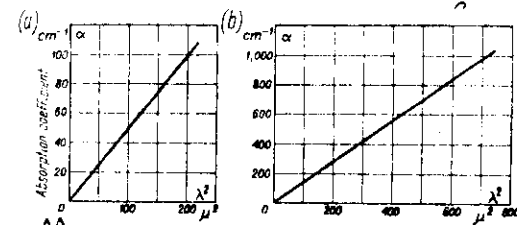


Fig. 2.2. Coefficient of absorption by free charge carriers in indium antimonide as a function of radiation wavelength: (a) carrier concentration $3.5 \times 10^{17} cm^{-3}$, (b) carrier concentration $6.2 \times 10^{17} cm^{-3}$.

In Sb.

II.4. Absorption excitonique

L'absorption intrinsèque et par impuretés, produisant des porteurs libres dans le BC et la BV. Un autre mécanisme d'absorption est possible. C'est la formation d'un exciton. Un exciton consiste en un électron excité, relié et serré, avec lequel il est lié par son propre champ. Bien qu'il s'agisse de la séparation d'une charge positive (trou) et négative (e^-) la charge résultante se déplaçant dans le cristal est zero. Donc cette absorption ne donne pas lieu à un courant.

Le spectre d'absorption consiste en un nombre de lignes distinctes correspondant aux niveaux excitoniques. La position des niveaux excitoniques / bases de la BC est donnée par la formule de Hols

$$E_h = - \frac{q^2 m_c q^4}{4 \pi^2 \epsilon_0 h^2}$$

prop. ex. imp. m. stant
pour Si p. de la de de de de;

$$m_e + m_h$$

mené - approuvé au système électrique
trou et le nombre quantique
orbital.

L'énergie caractéristique du quanta correspondant aux
lignes d'absorption extrinsèques est égal à :

$$h\nu_k = \Delta E - E_k$$

Débat

II. 5 Absorption par les vibrations du réseau

Les cristaux ioniques ont une bande d'absorption importante
dans l'infrarouge lointain, associée avec les vibrations
des ions dans le réseau. Les faces de liaisons interato-
miques des réseaux de cristaux ioniques sont comparables
avec les faces électroniques qui agissent à l'intérieur
des atomes. Puisque, cependant, le même ionique
est approximativement 10⁴ fois la même électronique,
le spectre associé avec les vibrations du réseau se
trouve dans l'infrarouge lointain.

Même dans l'inférieur des cristaux ioniques, l'absorption est faible
il existe une bande d'absorption comparative
importante à 50 μ .

Les bandes d'absorption associées avec les vibrations
du réseau de Ge et Si sont marquées ci-dessous

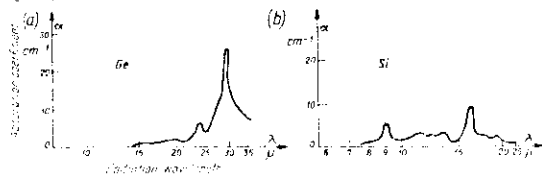


Fig. 23. Absorption spectrum of germanium and silicon associated with
lattice vibrations (after Fox and Borstein, 1961).

elle absorbe indépendamment de la concentration en impuretés

Elle ne sert pas à la conversion photovoltaïque
donc elle diminue le rendement.

Conclusion

Nous pouvons donc dire que les paramètres mentionnés
qu'il faut mesurer, lorsque l'on veut utiliser un
matériau en vue de fabriquer des photopiles
sont : la conductivité, la mobilité, τ est
important si avoir une mobilité élevée, la
durée de vie, la longueur de diffusion, la
longueur de diffusion, doit permettre aux porteurs
et atteindre la jonction (c'est-à-dire que
la jonction ne doit pas être trop profonde
l'absorption doit être élevée dans la zone
quand possible (couches antérieures)
les absorptions les plus importantes pour les
photopiles sont les absorptions intrinsèques et
extrinsèques

