

Biblio : | Sextant (Chap II)
 | Duffair (Chap X) BUP 70.
 | Michel Farizon.

Introduction

* Photorecepteur : dispositif qui peut capter un flux de lumière
 → naturels (molecules) → techniques (photodecteurs)
 ex : oeil.
 → transformer le flux en signal électrique.

But : se renseigner sur les propriétés de la source :
 - astrophysique.
 - biotraceurs émetteurs de photons.
 - ...

* 2 types de photodecteurs :
 - photoniques : sensibles aux photons absorbés (effet photoélectrique)
 - thermiques : sensibles à l'élévation de T liée à l'absorption du rayonn^t.

* Ici : étude de photodiode et thermopile.
photorésistance
 photoniques thermiques

→ comparaison de leurs caractéristiques
 → linéarité à l'intensité lumineuse reçue.
 → sensibilité
 → réponse spectrale.
 → temps de réponse.

Plan :

I - Caractéristique, linéarité, sensibilité

1) Photodiode 2) Photorésistance

II - Réponse spectrale de la photodiode.

III - Temps de réponse des détecteurs.

1) Photodiode 2) Photorésistance.

- Caractéristique, linéarité, sensibilité

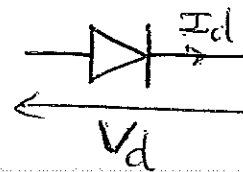
1) Photodiode

jonction de deux semi-conducteurs $\begin{cases} 1 \text{ dopé P} \\ 1 \text{ dopé N} \end{cases} \rightarrow \boxed{\text{P}|\text{N}} \Leftrightarrow \text{diode}$

Si un photon est absorbé au niveau de la zone de charge d'espace, une paire électron/trou est créée. Avec le champ régnant ds la ZCE $\rightarrow$ l' e^- se déplace de P vers N $\rightarrow$ création d'un photocourant I_{ph} dans le circuit.

En absence de lumière : caractéristique I_d/V_d donnée par allure exponentielle.

$I_d = I_s \left[\exp \left(\frac{e V_d}{k_B T} \right) - 1 \right]$
 courant d'obscurité $\sim nA$

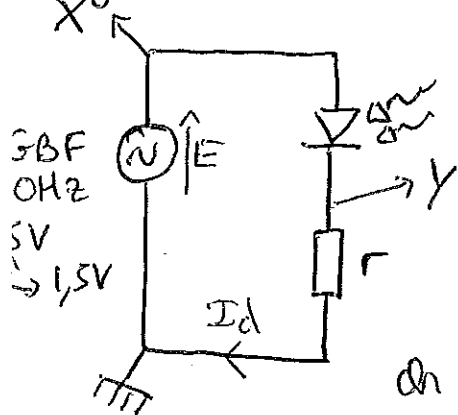


Au total : DIODE + Générateur de PHOTOCOURANT inverse

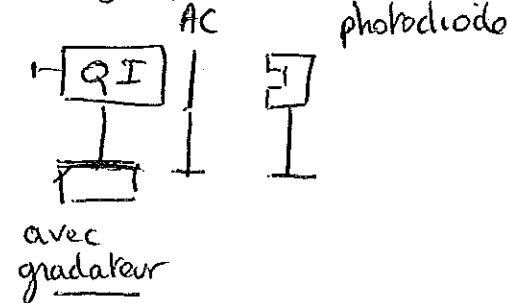
$$\Rightarrow I_d = I_s \left(e^{\frac{e V_d}{k_B T}} - 1 \right) - I_{ph}$$

exp : Tracé de la caractéristique de la photodiode.

Montage élec :



Montage optique :



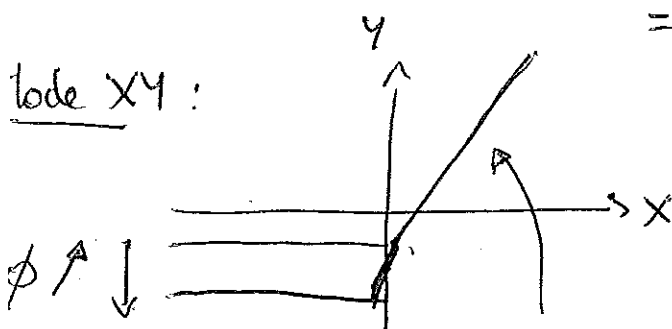
Rq : focaliser le filament sur la photodiode à l'aide du condensateur de la QI $\rightarrow$ gagner en amplitude sur le flux.

on mesure
$$\begin{aligned} Y &= I_d \times r \\ X &= V_d + r I_d \\ &= E \end{aligned}$$

montage longue dérivation

so enter conflits de phase
 so enter que tout le courant passe dans l'oscillo lorsque la diode $\equiv$ court-circuit

trace XY :

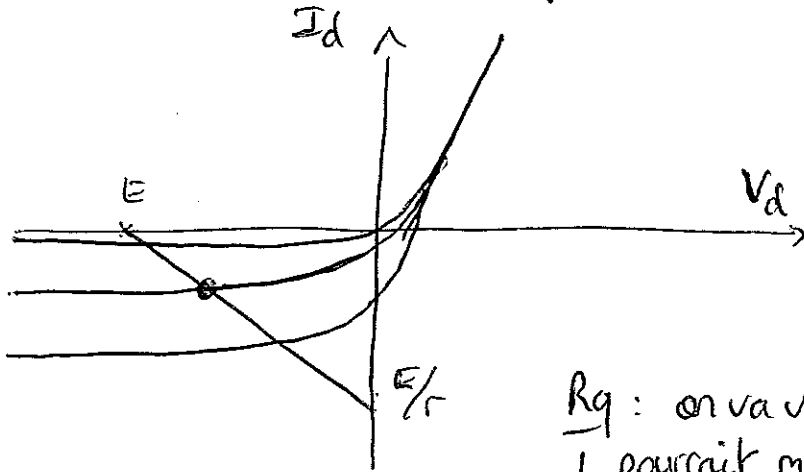


ici : caractéristique diode + résistance

$r = 5 \text{ k}\Omega$: pas trop élevée pour avoir $r I_d$ significatif.
élevée devant Z_e de l'oscillo ($1 \text{ M}\Omega$)

$\Rightarrow$ Plusieurs courbes à ϕ différents en préparation : $\begin{cases} V_d = X - Y \\ I_d = Y/r \end{cases}$

On veut être à $V_d < 0$: il faut choisir E et R pour être à $V_d < 0$



$\rightarrow I_d$ dépend seulement de ϕ via I_{ph} .

$$I_d \sim -I_{ph}(\phi)$$

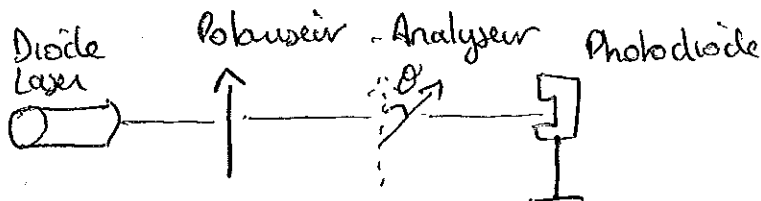
$\begin{cases} E = -2,5 \text{ V} \\ r = 5 \text{ k}\Omega \end{cases}$
convient encore pour ϕ_{max} de la QI .

Rq : on va utiliser la diode laser : on pourrait monter la caractéristique sans le flux lumineux de la diode laser : on est bien ϕ faible qu'au max de la QI , donc la polarisation $E = -2,5 \text{ V}$ $r = 5 \text{ k}\Omega$ convient.

$\Rightarrow$ il faut s'assurer de rester sur la portion inverse de la caractéristique.

Linéarité.

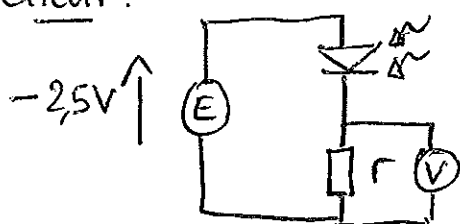
Manip : vérification de la linéarité de la $PhDiode$



Linéarité : permet de faire des mesures quantitatives

Rq : Diode laser a un signal ϕ fluctuant que le laser He-Ne $\rightarrow$ signal monochromatique (pas de ϕ de repos spectral)

Circuit :



On utilise la loi de Malus :

$$\Phi = \Phi_0 \cos^2(\theta + \epsilon)$$

Rq : ϵ : erreur systématique sur la lecture de l'angle de l'analyseur.
+ décalage entre les graduations des 2 analyseurs. (3)

Mesure en $\Phi(\theta)$ et en $\Phi(-\theta)$

$\rightarrow$ on s'affranchit des erreurs sur ϵ .

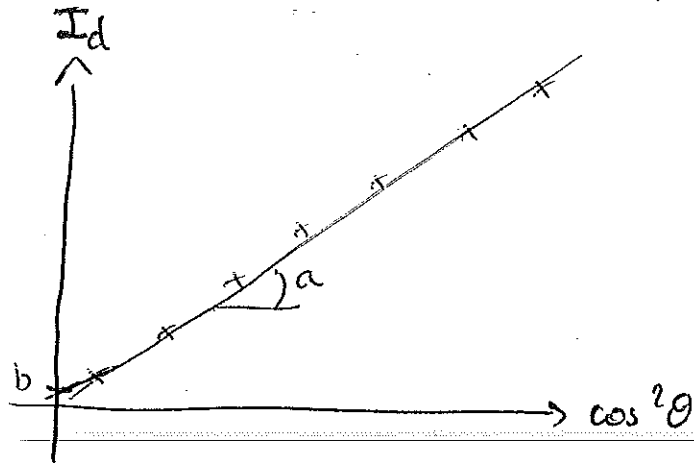
$$\frac{\Phi(\theta) + \Phi(-\theta)}{2} = \Phi_0 \cos^2 \theta + \theta(\epsilon)$$

$$\Rightarrow |I_d| \propto \cos^2 \theta$$

mesurée via $r I_d$

lecture :

$\theta_1 = \pm$	$\theta_2 = \pm$
$V_+ =$	$V_+ =$
$V_- =$	$V_- =$



⚠ lumière ambiante change
entre les préparations / LIVE
→ ordonnée à l'origine $\neq 0$

⚠ Vérifier que les polariseurs sont
bien $\perp$ au faisceau !

$$a = \pm$$

Sensibilité

Rapport du signal électrique de sortie sur le flux lumineux reçu :

$$S = \frac{I_{ph}}{\Phi} = \frac{a}{\Phi_0}$$

← puissance de la diode Laser à travers les
polariseurs par prendre en compte les coeff
de transmission énergétique des polariseurs.

Or mesure en préparation $\Phi_0 = 276 \mu W$.

AN : $S = \pm$

$$\left(\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta \Phi_0}{\Phi_0} \right)$$

↓
mesurée avec
le puissance-mètre
tout nouveau, tout zoli
THORLABS

→ 3% d'erreur sur Φ_0
(données constructeur)

q : // incertitude sur $r = 1\%$.
// incertitude sur la lecture de l'angle : 5%
(minimisée via la régression linéaire)

endement quantique :

Tous les photons absorbés ne permettent pas de
créer une paire $e^-/h\nu$:

On définit

$$\eta = \frac{\text{nb de paires créées}}{\text{nb de photons incidents}} = \frac{I_{ph}/e}{\Phi \lambda / hc} \quad (4)$$

Ici: $\eta = 5 \times \frac{hc}{e\lambda} \approx$

$\lambda = 653,5 \text{ nm. } (\pm 7 \text{ nm})$
(centraux)

(0,9 environ pour une photodiode)

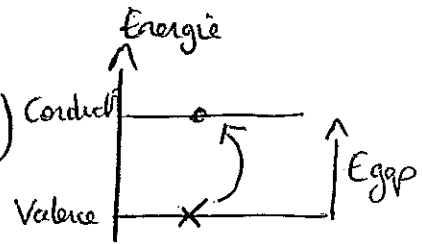
2) Photorésistance:

On a un unique $1/2$ conducteur, intrinsèque (i.e. non dopé)

Si un photon a une énergie $h\nu > E_{gap}$

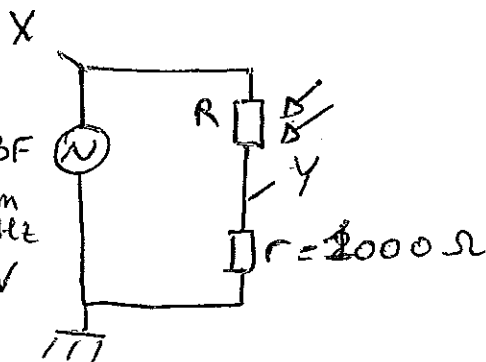
→ création d'une paire $e^-/h\nu$: conductivité ↑ → Résistance ↓

Flux ϕ ↑ ⇒ Résistance ↓ (1 MΩ à lumière ambiante
1 kΩ sous incidence lumineuse forte (qi))



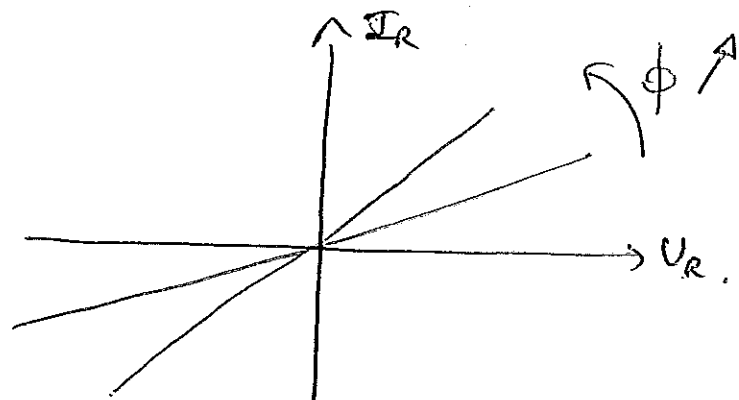
T.Manip: (en préparat?)

On trace la caractéristique $I_R = f(U_R)$ à différents flux.



De même: $U_R = X - Y$
 $I_R = \frac{Y}{r}$

perte $\frac{1}{R}$ augmenté avec ϕ



incertitude

Avec le même montage que précédemment, on utilise la loi de Ohm pour connaître le flux.

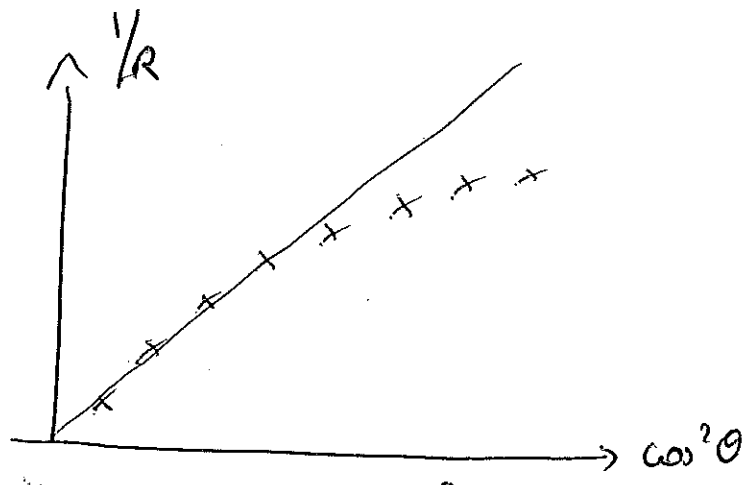
On mesure la résistance à l'ohmmètre

⚠ Serpentin de la PhR: (2) : n'éclairer qu'une portion pour avoir des résultats cohérents: il faut donc aligner la Diode Laser au préalable.

On prend 2 pts en direct (chgt de luminosité ambiante % préparation)

$\theta = \pm$
 $\theta =$
 $\theta =$

$\theta_2 = \pm$
 $R_1 =$
 $R_- =$



Rq : on trace $1/R$ car c'est ce qui est lié à la conductivité et donc au phénomène de création de paires électrons / trous.

⇒ on n'a pas un détecteur linéaire. (D'après l'extrait : $1/R \propto \Phi^\alpha$ où $\alpha \in [0,5;1]$)

→ pour une gamme de Φ , on pourra s'en servir.

Photorésistance : utilisée souvent comme détecteur. OBSCURITE / LUMIERE (tout ou rien)

B : sensibilité : selon la valeur de I si on alimente la photores. on va avoir I ± grand et regarder la sensibilité, et la comparer à celle de la photodiode sera dépourvu de sens. Avec une grande tension (1000V) on obtient une g^{de} sensibilité (la photorésistance est robuste) ilan :

	Photorésistance	Photodiode	(Thermopile)
sensibilité	Très bonne (avec g ^{de} tension)	Bonne	Mauvaise (≈ 0,2 mW/W)
linéarité	à faible flux lumineux	Bonne.	Bonne.

Rq : un photodétecteur n'est sensible qu'à un flux donné (saturation...) (polarisation limitée pour la photodiode)

Dependence en longueur d'onde ⇒ Sensibilité Spectrale (6)

II - Réponse spectrale de la photodiode

But: connaître le lien entre sensibilité du détecteur et longueur d'onde incidente.

Détecteurs photoniques: sensibles au flux divisé par l'énergie d'un photon:

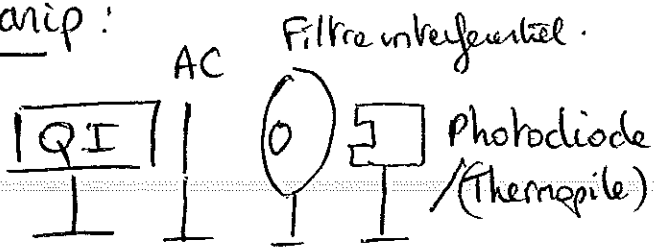
→ sensibilité va dépendre de λ

Détecteurs thermiques:

→ réponse spectrale plate (corps noir → Température)

→ On s'intéresse à la photodiode ici: on va mesurer $I_{ph}(\lambda)$

Manip:



On polarise la photodiode avec $E = -2,5V$ (comme $r = 5 k\Omega$ précédemment)
On mesure le courant I_{ph}

Problème: spectre de la QI: corps noir. } $\Rightarrow$ Source $\phi(\lambda)$
filtre AC: coupe les infrarouges. }

→ le filtre interférentiel sélectionne une λ donnée à $\pm 5nm$.

La réponse (ou sensibilité) spectrale de la photodiode se déduit du signal $I_{ph}(\lambda)$ mesuré, mais à normaliser par le flux incident lié à la source $\phi(\lambda)$.

⇒ On va utiliser un autre détecteur de réponse plate: thermopile

On lit la tension à ses bornes avec le nanovoltmètre (faible sensibilité)

$$U_{th}(\lambda) = K \phi(\lambda)$$

Bq: principe de la thermopile: surface noire qui s'échauffe sous le rayonnement

Température de la surface $\propto \phi_{resu}$.

* 1 Thermocouple fournit une tension $\propto$ élévation de Température.

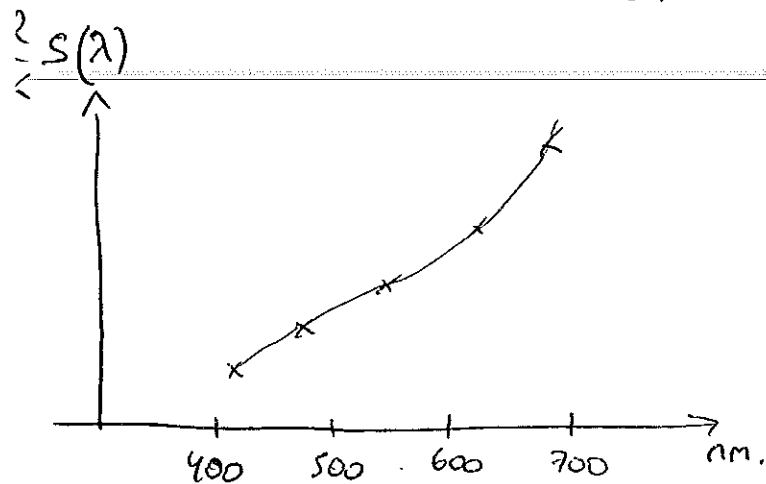
On a donc $U_{th}(\lambda) = K \Phi(\lambda)$ avec K indépendant de λ

~~On a en fait dans une thermopile plusieurs thermocouples, (i.e. plusieurs jonctions métalliques qui utilisent l'effet Seebeck)~~

pour: on choisit le filtre à $\lambda =$ nm
 $U_{th} =$

à m emplacement, on met la photodiode polarisée : $U_{ph} =$
 $I_{ph} =$

on reporte les valeurs de $\frac{U_{ph}(\lambda)}{U_{th}(\lambda)} = \frac{R}{K} \frac{I_{ph}(\lambda)}{\underbrace{\Phi(\lambda)}_{S(\lambda) \text{ sensibilité}}}$ en fonction de λ .



Rq: $\left\{ \begin{array}{l} \text{on pourrait utiliser un laser pour déterminer la valeur de } K \text{ via.} \\ U_{th}(\lambda_{laser}) = K \Phi(\lambda_{laser}) \\ \text{Ainsi, on trace directement } S(\lambda). \text{ En fait, seule l'allure nous intéresse.} \end{array} \right.$

La photodiode est $\oplus$ sensible vers le rouge

explication: photon $\oplus$ faible énergie (rouge) pénètrent $\oplus$ loin ds la jonction et sont absorbés $\oplus$ proche de la ZCE $\Rightarrow$ meilleur rendement quantique.

la manipulation dépend fortement de la manière dont on focalise la lumière, de l'emplacement de la photodiode quand on la remplace et de la thermopile. Etant dit qu'obtenir une allure est possible mais pour un jeu de filtres interférentiels sur une $\hat{m}$ roue (celles protégées), sont bien

Reprendre 1 point en direct $\Leftrightarrow$ remettre soit la thermopile soit la PhDiode

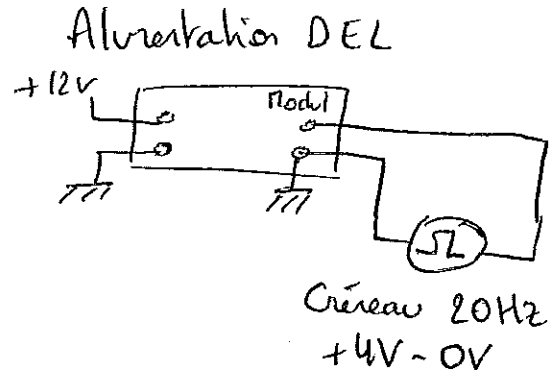
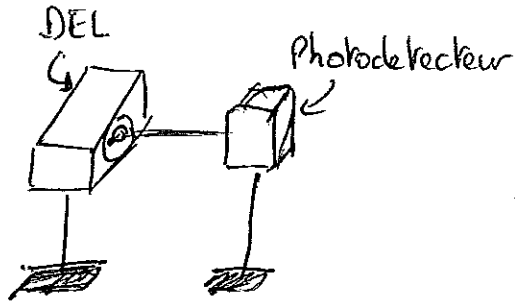
et donc s'exposer à une valeur $I_{ph}(\lambda)$ ou $U_{th}(\lambda)$ différente de celles faites en préparation.

Rq : en annexe ||| présentation des diverses tentatives pour améliorer cette partie franchement foirée (faible nb de points @ position...)

III Temps de réponse des détecteurs.

→ Performance dynamique : temps de réponse. → choix nécessaire selon les variations (vitesse de variation) de la source observée.

Manip :

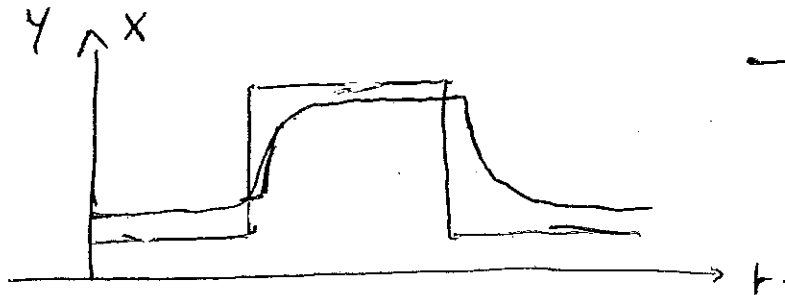


1) Photodiode

On effectue le montage de polarisation habituel : on observe à l'oscillo

en voie X : le signal créneau aux bornes de la DEL

envoie Y : le signal aux bornes de la résistance de charge : $r I_{ph}$



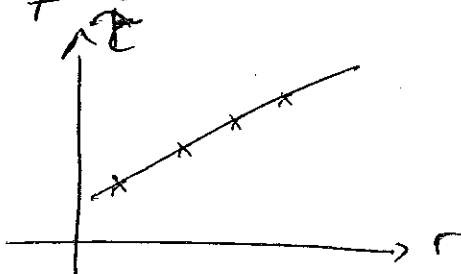
→ croissance / décroissance d'allure exponentielle (RC) du photocourant I_{ph} .

→ Capacité de Jonction de la Photodiode

C → dépend de la polarisation (quand $|E| \rightarrow 0$)
→ de la largeur de ZCE w ($C \propto 1/w$)

→ Capacité de l'oscillo (12 pF)
 du coax (1m $\rightarrow$ 100 pF)

Pour $r \neq 1$ on trace la valeur du temps de réponse en montée : (tps pour que l'on atteigne 90% de la valeur max)



$$\tau = \alpha r + \beta$$

||| (β vient des résistances du circuit non prises en compte) (9)

$$\alpha = \text{pF} \Rightarrow \text{Pin Diode} \quad C_{\text{jonction}} \approx \alpha - 112 \text{ pF}$$

marque :

à

! Ca en
de la
marque
so.
t-ête
gamma-t-il
de notes
bas de
ge, mais
concern de
marque
à lorsque
...
:))

On observe 1 palier : est-ce le tps de stockage des charges dans la jonction ?
faut-il y voir 1 phénomène d'écrantage du champ résultant de la jonction
par les électrons déjà créés ?

La partie exponentielle est liée à la traversée de la p-n diode par
les charges.

Le phénomène est vraiment complexe : mobilité des électrons et des trous
sont à prendre en compte (liés à la diffusion des e^- et des trous ds
les 2 parties de la jonction). De même la DEL indique un temps de
réponse de l'ordre de la ns, mais est-ce vrai ? On aperçoit
parfois du bruit au niveau du palier, signe que le signal lumineux
n'est pas en retard par rapport à l'excitation créneau de la DEL

Le problème est complexe, car on a une part importante due au
circuit de polarisation, et une autre qui est liée aux aspects
microscopiques des jonctions présentes.

Michel Fauzen semble très préoccupé par ce problème et est en train
de voir les raisons de cette apparition de palier en faisant
une batterie de tests. Il reste donc q'a attendre (et lui
demander)

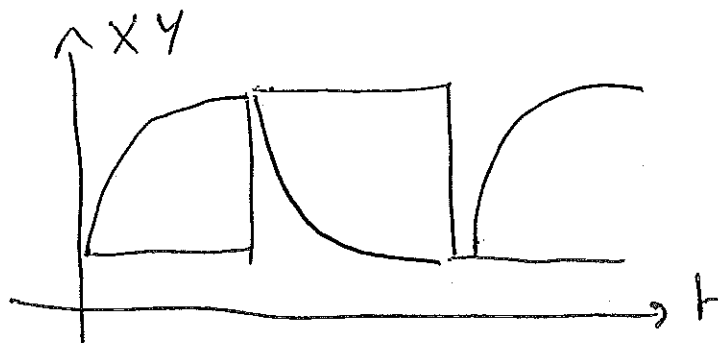
→ Tps de réponse de la photodiode : certains de nanosecondes

OK pour de nb phénomènes de la physique moderne (Quantum dots)
(Imagerie ...)

2) Photoresistance (PhR)

On mesure la tension $R \times i$ en V aux bornes de la PhR.

($\phi \uparrow \Rightarrow R \uparrow$)



→ temps de montée : dépend du circuit (et cause des effets non linéaires et des composants de nature selfique)
(décroissance du signal ?)
 R_d

→ temps de descente : lié aux recombinaisons ?
(croissance du signal)
 R_A electron / trou.

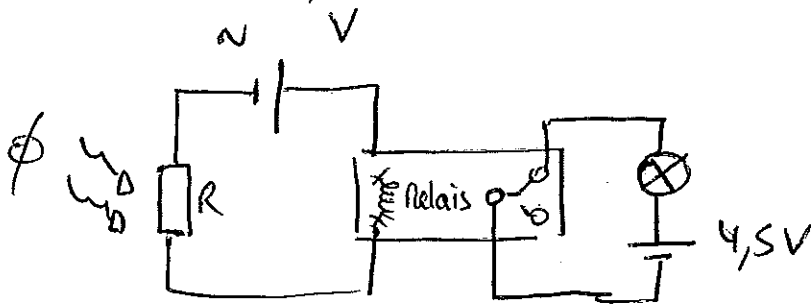
OG du temps de montée : E_M :
descente : E_D :

→ Détecteur médiocre : on s'en sert pour des détect° tout ou rien
(par exemple pour l'éclairage public).
... pq ?

les explications restent à être validées
→ difficile à comprendre
le tps de descente peut dépendre du circuit

Manip de conclusion : [BUP 70] p1318

On peut montrer le principe de fonctionnement de l'éclairage public (allumeur capsculaire).



Lorsque la photorésistance n'est pas éclairée R est grand
→ l'intensité est faible et le relais ne bascule pas
⇒ la lampe est allumée.

Dès que l'on atteint le courant de basculement (ce qui correspond à R_{lin} donc Φ_{lin})

on éteint la lampe.

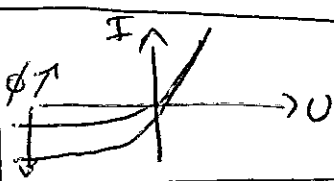
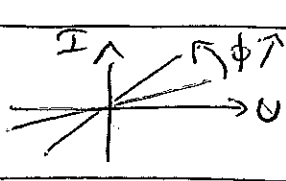
⇒ Bilan (photodétecteur cf page suivante)

Photodiode utilisée en optique de pointe / médecine.

Thermopile mesureur de puissance.

Photorésistance Automatismes de la Vie courante

Bilan :

Caractérist.	Photodiode	Photoresistance	Thermopile
carac I/U			pas de courant...
Sensibilité	Assez bonne ($\sim 0,6 \text{ A/W}$)	Bonne (dépend de U)	Faible.
Linéarité	OK (Δ polarisation)	Sur une petite gamme de flux	OK
Réponse spectrale	visible et proche IR.	visible et proche IR	plate.
Tps de réponse	Bonne $\sim \text{ns}$	Mauvaise $\sim \text{ms}$	Très mauvaise $\sim 5 \text{ s}$
Inconvenant	Très faible	Très faible.	Très grand ... $\sim 6 \text{ cm.}$
Prix	abordable 83 cts d'€	peu cher (le $\ominus$ cher)	très cher $\sim 20 \text{ €}$

60 cts d'€

Remarque

* Idée pour avoir plus de 5 poutres (donc 5 filtres) : utiliser un monochromateur - rotateur

Le monochromateur récent acquis par le département fonctionne à merveille : on peut choisir via logiciel la lg onde.

Problème : il n'y a que des fentes de $\sim 1\text{mm}$ qui sont extrêmement selectives (et ça c'est bon !) mais extrêmement peu lumineuses.

Pour une photodiode, cela marche (à condition d'utiliser une détection synchrone ; en mettant le hacheur devant la QI en amont du monochromateur et en récupérant le signal de la photodiode dans la détection synchrone).

Pour la thermopile, même avec une détection synchrone, il est impossible (et d'ailleurs vu le temps de réponse de la thermopile c'est inutile d'utiliser une DS) d'arriver à un signal exploitable (le bruit prend une place importante)

Si qqun trouve une solution (d'ici là les techniciens vont commander des fentes $\oplus$ larges $\Rightarrow \oplus$ g^{de} largeur de longueur d'onde, mais ça devrait suffire pour la luminosité ?)

on est prêt !