

TP de Physique n°15

Etude d'un capteur : la photodiode, et utilisation dans divers circuits

Objectifs de ce TP :

- Etablir la courbe caractéristique (courbe $i = f(u)$) d'une photodiode sous différentes conditions d'éclairement. Identifier les conditions dans lesquelles la photodiode peut se comporter comme un générateur d'électricité et calculer la puissance maximale qu'elle peut délivrer.
- Utiliser la photodiode pour réaliser un circuit permettant d'allumer une lumière quand la nuit tombe (par exemple, allumage automatique des phares d'une voiture ou des lampadaires urbains).
- Utiliser la photodiode pour étudier le signal infrarouge délivré par une télécommande quelconque. Essayer d'interpréter ce signal.

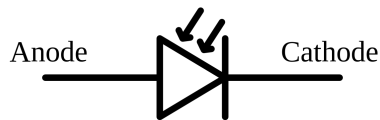
Présentation de la photodiode :

Une photodiode est un composant à base de semi-conducteur (souvent du silicium) sensible à la lumière, et capable de transformer un signal lumineux en un signal électrique.

Les photodiodes peuvent être utilisées en tant que capteur pour détecter la lumière ou mesurer son intensité. Ainsi, dans la vie de tous les jours, on en trouve par exemple dans les lecteurs CD, les détecteurs de fumée, les récepteurs de télécommande (par exemple sur une télévision). Elles sont aussi extrêmement répandues dans l'industrie et les laboratoires de recherches.

Dans le domaine des énergies renouvelables, les panneaux photovoltaïques sont aussi des photodiodes (de très grande surface) et servent à convertir l'énergie lumineuse du soleil directement en énergie électrique.

Une photodiode se représente dans un circuit comme ceci :



On voit que, contrairement à une résistance par exemple, c'est un dipôle qui a une polarité, c'est à dire que ses deux bornes (anode et cathode) ne sont pas équivalentes. Sur le modèle que nous utiliserons, l'anode est repérée par un rond (et une petite encoche).

Dans ce TP, on va utiliser une photodiode « BPW 21 » constituée de silicium et sensible aux longueurs d'onde entre 400 et 820 nm (du visible au proche infrarouge). Vous trouverez sa fiche technique en page suivante.

En l'absence de lumière, la photodiode se comporte comme une diode classique, c'est à dire qu'elle ne laisse passer le courant que de l'anode vers la cathode (et elle bloque le courant dans l'autre sens).

Par contre, lorsqu'elle est exposée à la lumière, un courant électrique peut exister dans le sens « inverse » (c'est à dire dans le sens où la diode est censée bloquer le courant), et l'intensité de ce courant « inverse » est proportionnelle à l'intensité lumineuse, ce qui permet d'utiliser la photodiode comme capteur.

Silicon PN Photodiode

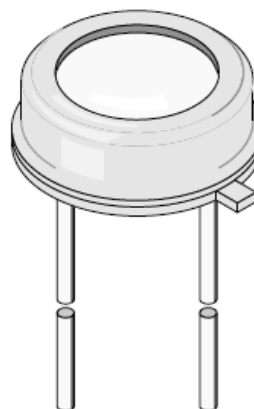
Description

BPW21R is a planar Silicon PN photodiode in a hermetically sealed short TO-5 case, especially designed for high precision linear applications.

Due to its extremely high dark resistance, the short circuit photocurrent is linear over seven decades of illumination level.

On the other hand, there is a strictly logarithmic correlation between open circuit voltage and illumination over the same range.

The device is equipped with a flat glass window with built in color correction filter, giving an approximation to the spectral response of the human eye.



Features

- Hermetically sealed TO-5 case
- Flat glass window with built-in color correction filter for visible radiation
- Cathode connected to case
- Wide viewing angle $\varphi = \pm 50^\circ$
- Large radiant sensitive area ($A=7.5 \text{ mm}^2$)
- Suitable for visible radiation
- High sensitivity
- Low dark current
- High shunt resistance
- Excellent linearity
- For photodiode and photovoltaic cell operation

Absolute Maximum Ratings

$T_{\text{amb}} = 25^\circ\text{C}$

Parameter	Test Conditions	Symbol	Value	Unit
Reverse Voltage		V_R	10	V
Power Dissipation	$T_{\text{amb}} \leq 50^\circ\text{C}$	P_V	300	mW
Junction Temperature		T_j	125	$^\circ\text{C}$
Operating Temperature Range		T_{amb}	$-55\dots+125$	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range		T_{stg}	$-55\dots+125$	$^\circ\text{C}$
Soldering Temperature	$t \leq 5 \text{ s}$	T_{sd}	260	$^\circ\text{C}$
Thermal Resistance Junction/Ambient		R_{thJA}	250	K/W

Basic Characteristics

$T_{\text{amb}} = 25^\circ\text{C}$

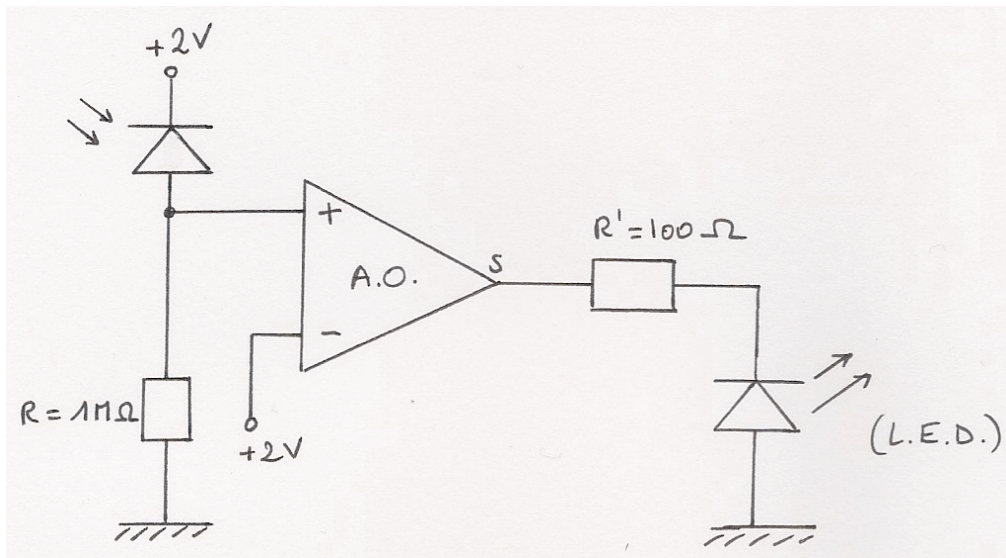
Parameter	Test Conditions	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Forward Voltage	$I_F = 50 \text{ mA}$	V_F		1.0	1.3	V
Breakdown Voltage	$I_R = 20 \mu\text{A}$, $E = 0$	$V_{(BR)}$	10			V
Reverse Dark Current	$V_R = 5 \text{ V}$, $E = 0$	I_{R0}		2	30	nA
Diode Capacitance	$V_R = 0 \text{ V}$, $f = 1 \text{ MHz}$, $E = 0$	C_D		1.2		nF
	$V_R = 5 \text{ V}$, $f = 1 \text{ MHz}$, $E = 0$	C_D		400		pF
Dark Resistance	$V_R = 10 \text{ mV}$	R_D		38		G Ω
Open Circuit Voltage	$E_A = 1 \text{ klx}$	V_o	280	450		mV
Temp. Coefficient of V_o	$E_A = 1 \text{ klx}$	TK_{V_o}		-2		mV/K
Short Circuit Current	$E_A = 1 \text{ klx}$	I_k	4.5	9		μA
Temp. Coefficient of I_k	$E_A = 1 \text{ klx}$	TK_{I_k}		-0.05		%/K
Reverse Light Current	$E_A = 1 \text{ klx}$, $V_R = 5 \text{ V}$	I_{Ra}	4.5	9		μA
Sensitivity	$V_R = 5 \text{ V}$, $E_A = 10^{-2}\dots10^5 \text{ lx}$	S		9		nA/lx
Angle of Half Sensitivity		φ		± 50		deg
Wavelength of Peak Sensitivity		λ_p		565		nm
Range of Spectral Bandwidth		$\lambda_{0.5}$		420...675		nm
Rise Time	$V_R = 0 \text{ V}$, $R_L = 1 \text{ k}\Omega$, $\lambda = 660 \text{ nm}$	t_r		3.1		μs
Fall Time	$V_R = 0 \text{ V}$, $R_L = 1 \text{ k}\Omega$, $\lambda = 660 \text{ nm}$	t_f		3.0		μs

I Un premier circuit utilisant la photodiode :

De nombreux appareils utilisent des photodiodes. On va réaliser un premier circuit électrique permettant d'allumer une lampe quand la luminosité ambiante devient trop faible. Ce type de circuit peut servir à déclencher les phares d'une voiture ou une lampe extérieure quand la nuit tombe, il peut servir aussi dans un détecteur de fumée, pour déclencher une alarme quand il y a trop de fumée.

Ce circuit utilise un composant actif dont l'étude approfondie n'est plus au programme de MPSI : l'amplificateur opérationnel, abrégé en AO ou AOp (ou encore ALI pour « amplificateur linéaire intégré »). Ce composant a besoin d'être alimenté (en général par une tension continue ± 15 V) : vous commencerez toujours par allumer son alimentation avant de l'utiliser !

Réalisez le circuit suivant, dans lequel vous utiliserez l'alimentation stabilisée pour générer la tension continue de $+2$ V. Vous n'oublierez pas de connecter la masse de l'alimentation stabilisée à celle de l'AO.



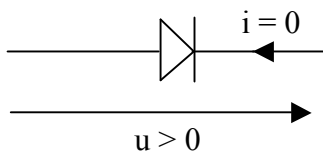
Si votre circuit fonctionne bien, quand la photodiode est exposée à la lumière, la LED (diode électroluminescente) est éteinte, mais si la photodiode ne reçoit plus de lumière (par exemple parce que vous avez mis la main dessus), la LED s'allume.

Question (y répondre une fois que vous aurez terminé le TP) : Expliquer le principe de fonctionnement du circuit, sachant que l'AO fonctionne en régime saturé, c'est à dire que l'on a :

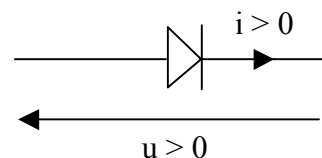
$$\begin{cases} v_s = +15 \text{ V si } v_+ > v_- \\ \text{et} \\ v_s = -15 \text{ V si } v_+ < v_- \end{cases} \quad (\text{où } v_s \text{ est la tension de sortie de l'AO, et } v_+ \text{ et } v_- \text{ sont les tensions de l'entrée + et de l'entrée -})$$

et que les courants i_+ et i_- qui rentrent dans l'AO sont toujours nuls.

Rem : La LED ou « diode électroluminescente » est, comme son nom l'indique, une diode capable d'émettre la lumière. Comme toute diode, elle ne laisse passer le courant que dans le sens anode $\rightarrow$ cathode (c'est à dire dans le sens du triangle avec lequel on la représente), mais, en plus, quand un courant la traverse, elle émet de la lumière :



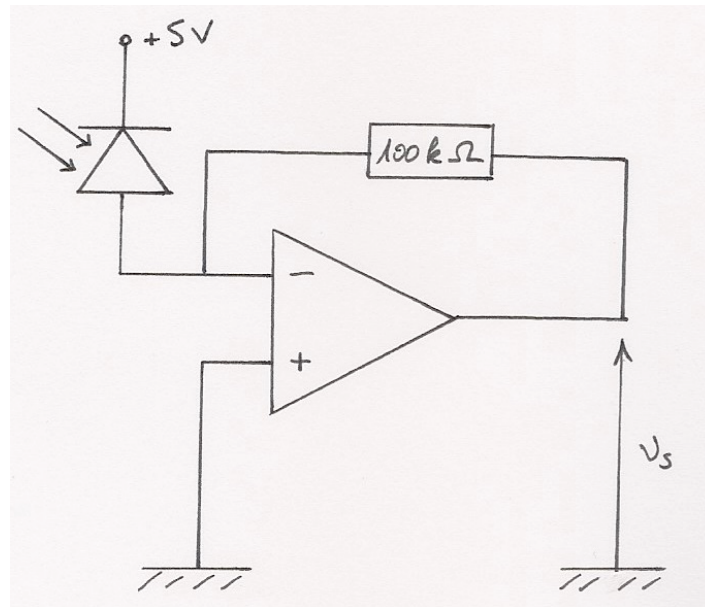
Diode bloquée : $i = 0$ (elle se comporte comme un interrupteur ouvert et n'émet pas de lumière).



Diode passante : $i > 0$ (elle se comporte comme un fil et émet de la lumière).

II Utilisation pour analyser le signal Infra-Rouge d'une télécommande :

Pour utiliser la photodiode comme simple capteur de lumière, on va réaliser le circuit suivant, où la photodiode est polarisée en inverse, c'est à dire dans la partie de sa caractéristique où le courant qui la traverse est proportionnel à l'intensité lumineuse qu'elle reçoit (voir la partie III) :



Une fois votre circuit réalisé, utilisez-le pour visualiser le signal émis par la télécommande lorsqu'on appuie sur une touche.

Remarque : au préalable, vous vérifierez que votre télécommande fonctionne et émet dans les proches infra-rouges en la pointant vers l'appareil photo de votre téléphone portable (si votre téléphone fait appareil photo), puisque le capteur CCD ou CMOS du téléphone détecte lui-aussi les IR (c'est le même type de technologie que la photodiode).

Document : Le protocole PHILIPS RC5 (utilisé par une grande partie des télécommandes infra-rouges), d'après Wikipédia :

The command data is a Manchester coded* bitstream modulating a 36 kHz carrier. (Often the carrier used is 38 kHz or 40 kHz, apparently due to misinformation about the actual protocol.) The IR signal from the transmitter is detected by a specialized IC with an integral photo-diode, and is amplified, filtered, and demodulated so that the receiving device can act upon the received command.

The command comprises 14 bits:

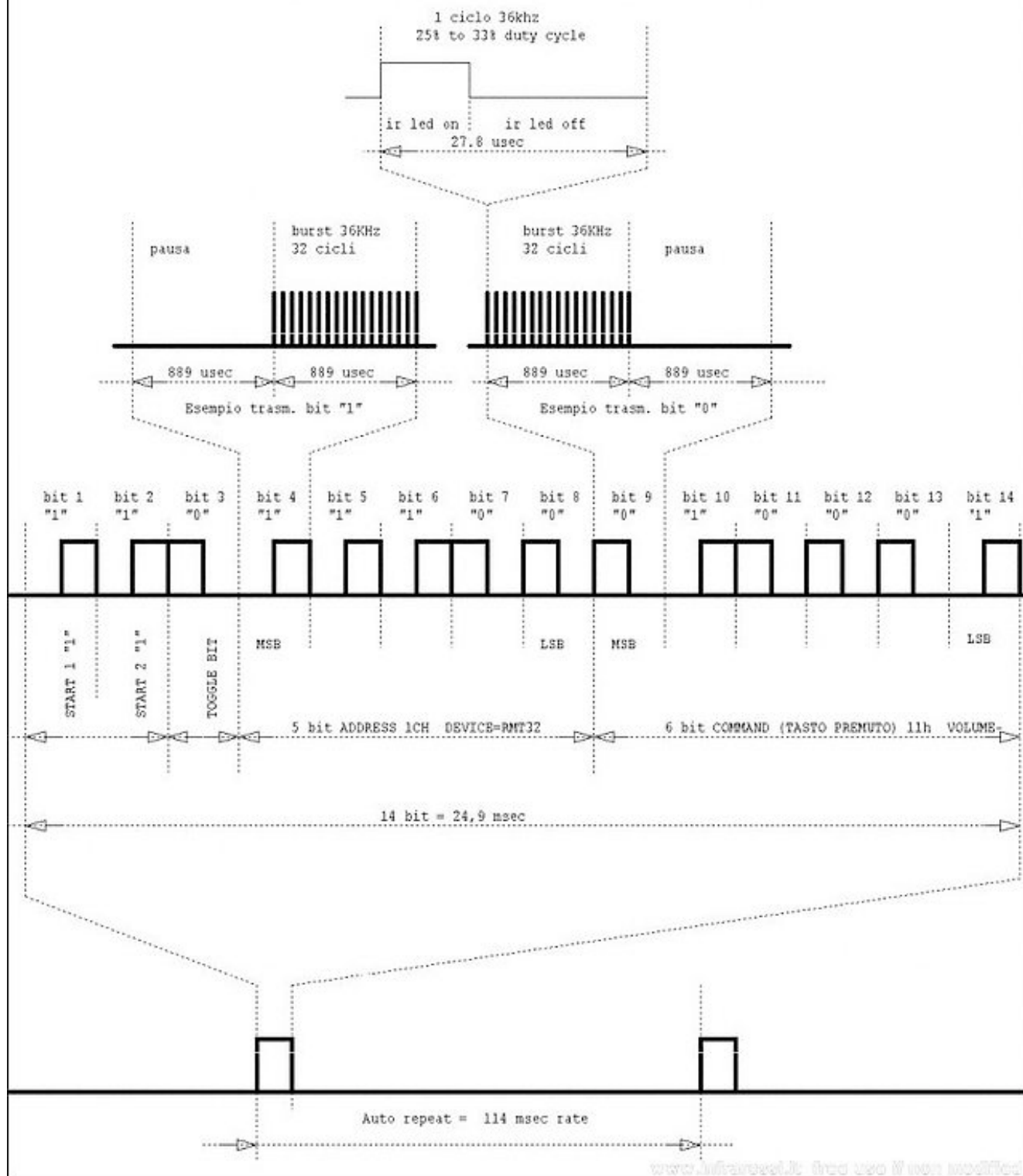
- A start bit, which is always logic 1 and allows the receiving IC to set the proper gain.
- A field bit, which denotes whether the command sent is in the lower field (logic 1 = 0 to 63 decimal) or the upper field (logic 0 = 64 to 127 decimal). The field bit was added later by Philips when it was realized that 64 commands per device were insufficient. Previously, the field bit was combined with the start bit. Many devices still use this original system.
- A control bit, which toggles with each button press. This allows the receiving device to distinguish between two successive button presses (such as "1", "1" for "11") as opposed to the user simply holding down the button and the repeating commands being interrupted by a person walking by, for example.
- A five-bit system address, that selects one of 32 possible systems.
- A six-bit command, that (in conjunction with the field bit) represents one of the 128 possible RC-5 commands.

The 36 kHz carrier frequency was chosen to render the system immune to interference from TV scan lines. Since the repetition of the 36 kHz carrier is 27.778 μs and the duty factor is 25%, the carrier pulse duration is 6.944 μs.

Since the high half of each symbol (bit) of the RC-5 code word contains 32 carrier pulses, the symbol period is 64 x 27.778 μs = 1.778 ms, and the 14 symbols (bits) of a complete RC-5 code word takes 24.889 ms to transmit. The code word is repeated every 113.778 ms (4096 / 36 kHz) as long as a key remains pressed. (Again, please note that these timings are not strictly followed by all manufacturers, due to a lack of widespread distribution of accurate information on the RC-5 protocol.)

Le codage Manchester est une façon de coder l'information en binaire (0 et 1) où les « 1 » correspondent à une variation du signal de son niveau « haut » vers son niveau « bas » et les « 0 » correspondent au passage du niveau « bas » vers le niveau « haut ».

RC-5 PHILIPS PROTOCOL



Le signal IR de votre télécommande est-il modulé à 36 kHz comme c'est souvent le cas ? On peut se débarrasser de cette modulation en faisant passer le signal par un filtre passe bas (par exemple un circuit RC où la sortie est sur le condensateur) : n'hésitez pas à le faire si vous avez le temps !

Le signal correspondant à une touche est-il bien codé sur 14 bits, comme dans le protocole Philips RC5 ? Essayez d'identifier les 5 bits correspondant à l'appareil (ils doivent être les mêmes quelle que soit la touche appuyée) et les 6 bits correspondant à chaque commande. Quelles sont les séquences de bits pour les touches volume + et volume -, dans le cas d'une TV ?

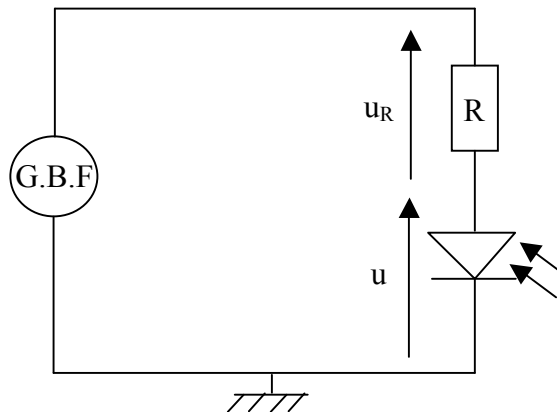
III Tracé de la caractéristique de la photodiode sous différents éclairagements :

Maintenant que l'on a vu à quoi la photodiode peut servir, on va essayer de comprendre comment elle fonctionne. Pour cela, on va tracer sa caractéristique, sous différents éclairagements.

Rappeler ce qu'est la « caractéristique » d'un dipôle, et comment on peut la tracer « point par point » :

Le tracé « point par point » de la caractéristique est plutôt laborieux et prend du temps. On va voir qu'à l'aide du GBF et de la carte d'acquisition, on peut tracer automatiquement la caractéristique.

On va réaliser le circuit suivant, dans lequel le GBF délivre un signal sinusoïdal de période $T = 2$ s et d'amplitude 6V, sans offset (vous utiliserez l'oscilloscope pour le régler). Vous prendrez $R = 10\text{ k}\Omega$.



Sur une période (2 s), vous mesurerez (avec Latis Pro et le boîtier d'acquisition) les tensions u et u_R . Vous pourrez ensuite calculer le courant i qui traverse la photodiode puisque $u_R = Ri$.

Remarque : Vous ne pouvez pas mesurer directement u_R puisqu'aucune de ses bornes n'est reliée à la masse. Par contre, avec Latis Pro, vous pouvez mesurer la tension $e(t)$ délivrée par le GBF ainsi que la tension $u(t)$ aux bornes de la photodiode, puis calculer (aller dans « Traitements » -> « Feuille de calculs ») la tension $u_R = e - u$.

Faites ensuite apparaître sous Latis Pro la caractéristique de la diode dans deux conditions différentes :

- une dans le noir (vous pouvez par exemple mettre un vêtement opaque sur la photodiode)
- une quand la diode est éclairée par le Laser vert

Commentez ces caractéristiques. En particulier, montrez que la photodiode se comporte comme une diode « classique » quand elle est dans le noir, et indiquez les différences qui se produisent quand elle est éclairée.

Indiquer dans quelle partie de la caractéristique la photodiode se comporte comme un générateur d'électricité. C'est ce domaine qui est utilisé dans l'industrie photovoltaïque.

Plus précisément, déterminez, lorsque la diode est éclairée par le Laser, la puissance maximale qu'elle peut délivrer (en Watts), et les valeurs de u et de i auxquelles cette puissance maximale est atteinte.

Sachant que la surface photosensible de la diode a une aire de $7,5\text{ mm}^2$, déduisez-en la puissance surfacique maximale produite par la photodiode lorsqu'elle est éclairée par le Laser. Quelle surface devrait-elle avoir (approximativement) si on voulait l'utiliser pour alimenter un ordinateur portable (puissance consommée de l'ordre de 50 W environ).

Question (y répondre une fois que vous aurez terminé le TP) : la caractéristique théorique de la photodiode est :

$$I = I_{sat} \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right) - I_p$$

où I_p est le « photocourant » (courant dû à la lumière : $I_p = 0$ dans le noir), I_{sat} est une constante appelée « courant de saturation inverse », e est la charge de l'électron et k_B est la « constante de Boltzman ».
Cette expression théorique est-elle en accord avec vos courbes caractéristiques expérimentales ? Utilisez vos courbes pour trouver une valeur approchée de la constante de Boltzman k_B .