

Problème IPhO : Diode électroluminescente et lampe de poche

Les diodes électroluminescentes (DEL ou LED en anglais) sont de plus en plus utilisées pour l'éclairage : affichages colorés, lampes de poche, éclairage domestique ... Dans ce composant, l'énergie électrique est convertie directement en lumière au sein d'un matériau semiconducteur. Nous nous proposons d'étudier la physique de ce dispositif à partir des chiffres expérimentaux que l'on peut trouver sur les notices techniques de ces composants. Les différentes parties du problème peuvent être traitées séparément, néanmoins les différentes données techniques valent pour n'importe quelle partie du problème.

1 Emission de lumière par une diode électroluminescente

On étudie la lumière émise par une diode électroluminescente, et avec quelle efficacité. Le schéma de branchement électrique d'une LED est indiqué dans la figure suivante. Comme toute diode, la LED ne laisse passer le courant que dans un sens. En outre le passage du courant électrique dans la diode est associé à l'émission de lumière. Lorsque les électrons (qui conduisent le courant dans l'une des moitiés de la diode) rencontrent les trous (qui assurent la conduction de l'autre côté) au niveau de la jonction, la recombinaison electron-trou s'accompagne de l'émission d'un photon. L'émission de lumière par une diode électroluminescente est ainsi un phénomène quantique.

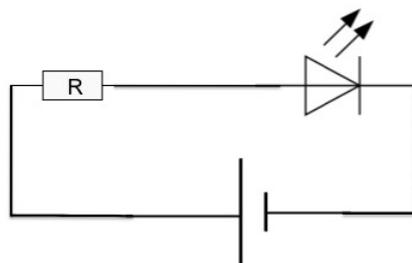


FIGURE 1: Branchement électrique d'une LED

1.1 Couleur émise

Une diode électroluminescente "de base" émet une lumière que l'on peut considérer monochromatique. Les données fournies par un fabricant montrent que la tension aux bornes d'une LED en fonctionnement dépend de la longueur d'onde émise par la diode. Voir le tableau qui suit.

Ce tableau donne les caractéristiques optiques et électriques d'un certain nombre de LED. Toutes les données présentées dans le tableau le sont pour un courant électrique circulant dans la LED de 10 mA.

Color	Technology	lp	ld	DI	fv	fe	V_F
		nm	nm	nm	mlm	mW	V
Red	GaAlAs on GaAs	650	648	20	60	0.82	1.80
Red	GaAsP on GaP	635	620	38	30	0.20	2.00
Red	AllnGaP on GaAs	643	630	15	200	1.22	1.85
Red	AllnGaP on GaAs	620	618	20	400	1.5	1.85
Red (OMA)	AllnGaP on Si	622	615	18	600	2.5	2.8
Softorange	AllnGaP on GaAs	610	605	17	400	1.2	1.90
Softorange	GaAsP on GaP	610	605	36	25	0.06	2.00
Yellow	AllnGaP on GaAs	590	588	20	200	0.78	1.90
Yellow	GaAsP on GaP	585	590	38	30	0.05	2.00
Yellow Green	AllnGaP on GaAs	574	572	20	80	1.12	2.0
Green	GaP on GaP	565	570	38	35	0.05	2.00
Pure Green	GaP on GaP	555	560	22	12	0.02	2.00
Pure Green	AllnGaP on GaAs	561	562	20	30	0.05	2.00
True Green	InGaN on SiC	518	523	35	250	0.55	3.10
Blue Green	InGaN on SiC	503	505	30	200	0.79	3.20
Blue	InGaN on SiC	463	470	25	75	1.21	3.60
Blue	GaN on SiC	428	466	65	25	0.96	3.70

FIGURE 2: Caractéristiques techniques typiques de quelques LED du fabricant VISHAY. l_p est la longueur d'onde correspondant au maximum d'émission, l_d la longueur d'onde moyenne du pic d'émission, et DI la largeur à mi hauteur du pic d'émission. f_v correspond au flux lumineux émis exprimé en millilumen. f_e le flux radiatif émis exprimé en milliwatt. V_F est la tension de fonctionnement nominal de la LED.

1- A partir des données du tableau, tracer la tension notée V_F en fonction de l'inverse de la longueur d'onde d'émission maximale pour les LED fabriquées sur de l'arsénure de gallium. Quelle relation mathématique met-on en évidence avec ce graphe? La déterminer. On utilisera la feuille de papier millimétrée fournie.

Ce lien entre la tension de fonctionnement et la longueur d'onde de la lumière émise correspond à l'effet réciproque de l'effet photoélectrique, c'est-à-dire ici la conversion d'une énergie électrique en un quantum d'énergie lumineuse.

2- Montrer que la tension V_F est reliée à l'énergie électrique d'un électron traversant la jonction. Quelle est la relation entre la longueur d'onde λ émise et l'énergie d'un photon ayant cette longueur d'onde. En déduire le lien théorique entre λ et V_F .

3- A partir des questions précédentes, évaluer la constante de Planck. On essaiera de donner une incertitude à cette valeur expérimentale. On donne $c=3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ la vitesse de la lumière dans le vide et $e=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ la charge élémentaire.

1.2 Efficacité d'une diode électroluminescente

Une courbe, fournie par le constructeur, permet de relier la puissance lumineuse émise par la diode au courant électrique qui la traverse. La courbe qui suit correspond à l'intensité lumineuse relative émise par la LED rouge à 620 nm, en fonction de l'intensité électrique qui traverse la LED.

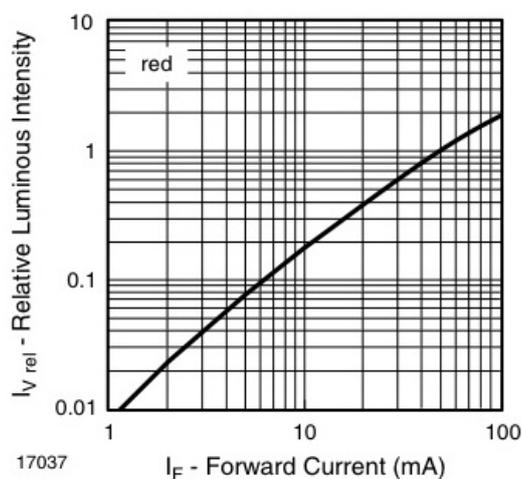


FIGURE 3: Intensité lumineuse relative en fonction du courant traversant la LED. La valeur 1 pour cette intensité relative correspond à une puissance lumineuse émise de 16 mW.

On souhaite déterminer maintenant le rendement quantique d'une LED, c'est-à-dire le nombre de photons émis en moyenne pour chaque charge électrique élémentaire traversant la jonction.

4- Quelle est l'énergie d'un photon rouge de 620 nm ? A combien de photons par seconde correspond une puissance de 16 mW ?

5- A partir de la courbe, déterminer pour cette puissance le nombre d'électrons traversant la jonction par unité de temps. En déduire le rendement quantique de la LED, c'est à dire le rapport du nombre de photons produits par le nombre d'électrons qui traversent la diode.

6- Quel est le rendement énergétique de la LED (puissance lumineuse émise / puissance électrique consommée) ? Comparer avec d'autres sources lumineuses que vous connaissez.

2 Alimentation de la LED par une batterie

On souhaite maintenant étudier une lampe torche à LED, alimentée par une batterie. L'idée est de déterminer l'autonomie d'une telle lampe.

2.1 Analyse d'une pile électrique

Pour déterminer l'autonomie d'une lampe, il faut avant tout connaître la capacité¹ de la pile. Nous considérons ici une pile LR06. La capacité d'une telle pile dépend du courant débité, comme le montre le document technique suivant :

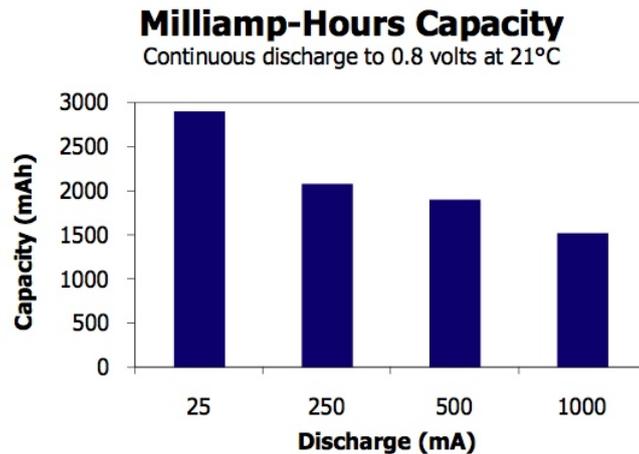


FIGURE 4: Capacité maximale d'une pile LR06 selon différents courants débités. La tension de fonctionnement et la température sont fixées.

7- Combien d'électrons fournit la pile lorsque le courant est de 25 mA ? Estimer le volume d'une pile LR06 (c'est la pile bâton la plus répandue). En imaginant la pile comme un "réservoir à électron", quel volume occupe chaque électron stocké ? Comparez la taille correspondante avec des tailles que vous connaissez.

1. La capacité d'une pile sera exprimée en ampère heure, noté Ah. La définition de l'ampère heure est semblable à celle du Watt heure : une charge de 1 Ah correspond à la charge débitée en une heure par un conducteur traversé par une intensité de 1 ampère.

8- Quelle est l'énergie maximale récupérable avec cette pile ?

2.2 Modèle cinétique d'une pile

En analysant la figure 4, on constate que la capacité d'une pile dépend de l'intensité débitée. L'explication physique de ce phénomène étonnant réside dans le fonctionnement cinétique d'une pile électrochimique. En fait, la capacité d'une pile dépend directement de la réalisation d'une réaction d'oxydo-réduction, et la pile s'arrête quand il n'y a plus d'espèces chimiques disponibles pour la réaction chimique. Le fonctionnement interne d'une pile impose que seule une partie des espèces chimiques présentes dans la pile intervient dans la capacité électrique de la pile. On peut voir la pile comme un double puits de charges électriques : un premier puits de charges de réserve et un deuxième puits de charges disponibles, les deux étant en interaction par un flux de charges noté k . Le schéma suivant résume bien la chose :

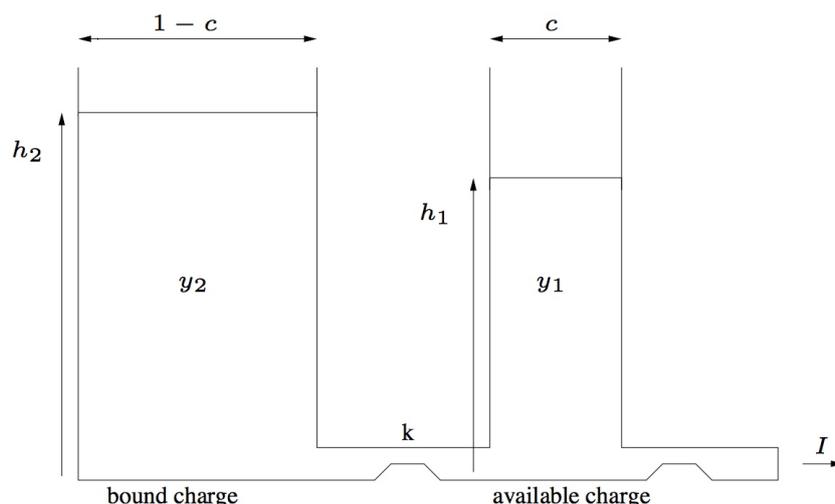


FIGURE 5: Modèle cinétique d'une pile : k est le couplage entre les deux puits, le taux d'échange de charges entre les deux puits est proportionnel à la différence de hauteur dans les deux puits et à k . c est la fraction de capacité disponible et correspond à la largeur du puits. I est le courant débité dans la charge, supposé constant ici ; y_2 et y_1 sont des capacités en Ah et sont représentées dans le modèle comme des surfaces, avec h_2 et h_1 les hauteurs respectives du puits des charges de réserve et du puits des charges disponibles.

9- A partir de ce schéma, écrire les deux équations régissant l'évolution temporelle des charges ou capacité y_2 et y_1 des deux puits.

La solution mathématique de ces équations donne pour $y_1(t)$:

$$y_1(t) = y_{10}e^{-k't} + (y_0c - \frac{I}{k'}) (1 - e^{-k't}) - Ic(t - \frac{1}{k'} + \frac{1}{k'}e^{-k't}), \text{ avec } k' = \frac{k}{c(1-c)}$$

10- A partir de l'expression de y_1 donnée, déterminer la durée de fonctionnement T de la pile et l'exprimer en fonction de y_0 , k' et c . On supposera $k'T \gg 1$. Commentaires physiques sur l'expression obtenue.

11- Le constructeur de pile LR06 indique une durée de vie de 3,2 heures pour un fonctionnement à 500 mA. Sachant que $k = 1,15 \cdot 10^{-4}$ SI, en déduire c ? Par la suite, pour le calcul de l'autonomie de la lampe de poche, on prendra pour la pile non pas la capacité théorique donnée à la figure 4, mais la capacité disponible $y_{10} = c * y_0$.

2.3 La lampe torche

La lampe torche à LED étudiée ici a les caractéristiques suivantes :

- 1 LED blanche,
- fonctionne avec trois piles LR06,
- puissance lumineuse de 100 lumens (la documentation technique de cette LED est résumée sur les deux graphes suivants),
- autonomie à 100 lumens : 3 h,

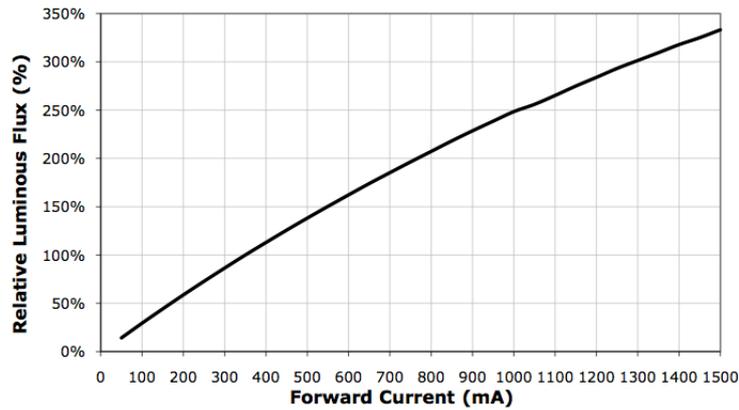


FIGURE 6: Flux lumineux émis par la LED blanche en fonction du courant la traversant. Le flux lumineux de référence est égal à 139 lumens.

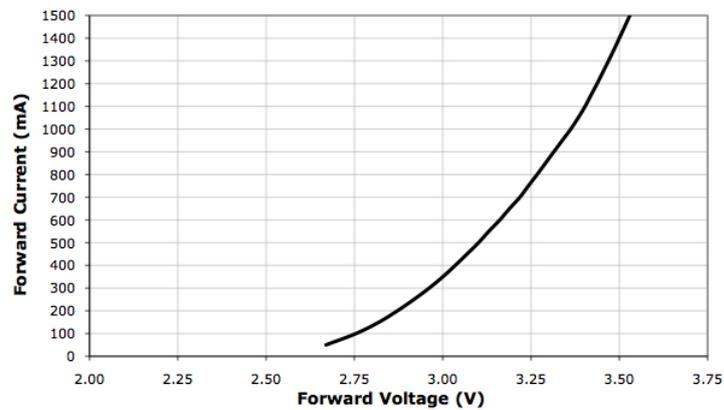


FIGURE 7: Tension de fonctionnement de la LED blanche en fonction du courant la traversant.

12- Que vaut la charge en coulombs disponible dans la lampe torche, fonctionnant à 100 lumens ? On pourra utiliser les données disponibles en 2.1.

13- Quelle est la puissance électrique consommée par la LED fonctionnant à 100 lumens ?

14- En déduire l'autonomie de la lampe torche ? Comparer à la valeur donnée par le constructeur. Pourquoi trouve-t-on une autonomie plus grande que celle donnée par le constructeur ? Proposer une explication.