

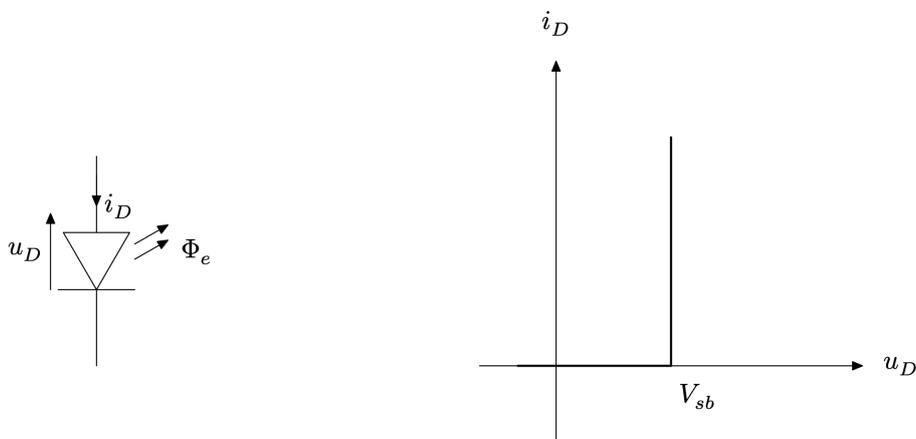
À rendre le mercredi 9 octobre 2024

Connexion à Internet par LIFI

On étudie la technologie LiFi (Light Fidelity), ainsi nommée par analogie avec le WiFi (Wireless Fidelity), une solution innovante pour les connexions Internet individualisées dans des espaces restreints tels que la cabine d'un avion ou un wagon de train. Le LiFi exploite la lumière visible pour transmettre l'information. Son apparition coïncide avec le développement de l'éclairage par les diodes électroluminescentes.

Document

Comme pour les diodes « simples », les diodes électroluminescentes mettent en jeu une jonction entre deux matériaux semi-conducteurs (jonction PN). Les photons sont émis lorsque le courant direct qui traverse la jonction provoque la recombinaison d'une paire électron-trou. La caractéristique d'une diode électroluminescente varie selon la couleur émise. Dans le cas d'une diode émettrice de lumière bleue, la caractéristique courant-tension a l'allure suivante :



Pour $i_D > 0$, la diode considérée émet une lumière bleue de longueur d'onde dans le vide $\lambda_b = 470 \text{ nm}$; la tension à ses bornes est alors égale à $V_{sb} = 2,90 \text{ V}$. Le rendement en puissance de la diode électroluminescente, défini comme le rapport de la puissance lumineuse Φ_e émise sur la puissance électrique reçue, est égal à $\eta_{\text{led}} = 33 \%$.

En première approximation, on peut considérer que la puissance lumineuse Φ_e est rayonnée de façon isotrope dans le demi-espace qui se situe au-dessus du composant.

Dans ce problème, nous ne considérerons que le flux de données descendant vers l'utilisateur. Le schéma de la figure 1 représente le principe de la transmission d'une information par la lumière. La tension u_e contient le signal informatif. Elle alimente la diode électroluminescente D_1 émettrice de lumière bleue, de sorte que l'amplitude de l'onde lumineuse émise soit modulée par le signal u_e . La diode D_2 , polarisée en sens indirect grâce au potentiel V_0 qui est positif, est photoréceptrice. L'intensité i_2 du courant qui parcourt D_2 est proportionnelle au flux lumineux qu'elle reçoit, de sorte que la tension u_r contient l'information utile.

1 — Émission du signal lumineux

Dans le circuit émetteur, la résistance $r_e = 10 \Omega$ a pour fonction de commander le passage du courant dans la diode par la tension u_e , en même temps qu'elle la protège. La diode émet de la lumière lorsque l'intensité du courant i_1 qui la traverse en sens direct est positif; on notera la puissance lumineuse moyenne émise Φ_e . Dans le modèle adopté, la puissance moyenne émise est proportionnelle au courant i_1 avec un coefficient de proportionnalité K_e , soit $\Phi_e = K_e i_1$.

1. Déterminer la valeur constante minimale U_{\min} de u_e qui permet d'obtenir une émission lumineuse par la diode.
2. Calculer la valeur constante U_0 de u_e qui permet d'obtenir un courant i_1 constant égal à $i_0 = 0,73 \text{ A}$ à travers la diode. Calculer la puissance lumineuse moyenne correspondante, notée Φ_{e0} , émise par la diode.

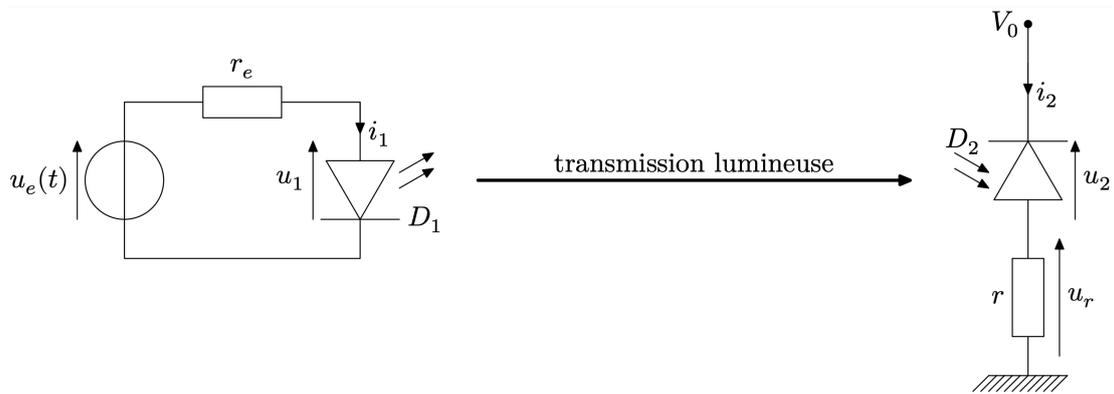


FIGURE 1 – Principe de la transmission d'information par la lumière

Pour transmettre une information par la lumière, la technologie LiFi utilise le principe de la modulation d'amplitude. Le signal porteur correspond au signal lumineux de longueur d'onde λ_b émis par la diode, dont on module l'amplitude à l'aide d'un signal sous-porteur $p(t)$. Par la suite, on considère que le signal sous-porteur est sinusoïdal, d'amplitude p_m , de fréquence $f_p = \omega_p/2\pi$ et de phase à l'origine α_p : $p(t) = p_m \cos(\omega_p t + \alpha_p)$.

On note $a(t)$ la tension correspondant au signal contenant l'information ; les fréquences contenues dans le spectre de $a(t)$, notées f_q , sont très inférieures à la fréquence f_p .

On génère la tension $u_e(t)$ du circuit émetteur grâce au circuit de la figure 2, qui contient un bloc multiplieur M_1 et un bloc additionneur A_1 . Le bloc multiplieur M_1 réalise le produit des deux tensions d'entrée, soit dans le cas du circuit considéré $m_1(t) = k_m \times p(t) \times a(t)$, avec $k > 0$. Les impédances d'entrée des blocs A_1 et M_1 sont infinies.

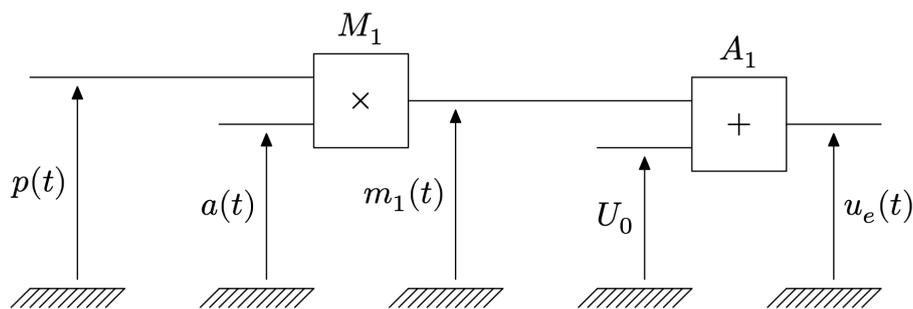


FIGURE 2 – Schéma du circuit de réalisation de $u_e(t)$

3. Exprimer la tension $u_e(t)$ dans le cas où $a(t)$ est un signal sinusoïdal d'amplitude a_m , de fréquence $f_a = \omega_a/2\pi$ telle que $f_a \ll f_p$. Quelle est la valeur maximale du produit $k \times p_m \times a_m$ qui permet de s'assurer que la diode électroluminescente émet toujours de la lumière ?
4. Représenter l'allure du signal $u_e(t)$, ainsi que l'allure de son spectre, dans le cas où le signal $a(t)$ est sinusoïdal de fréquence $f_a = f_p/10$.
5. Représenter l'allure du signal $u_e(t)$, ainsi que l'allure de son spectre, dans le cas où le signal $a(t)$ est un signal créneau variant entre 0 et a_m , de fréquence $f_a = f_p/10$. L'allure d'un spectre d'un tel signal créneau est donné en annexe.

2 — Réception du signal lumineux et extraction de l'information

La photodiode réceptrice est située à la distance d de la diode émettrice et capte le flux lumineux Φ_r qui arrive sur sa surface, d'aire s_r . Lorsqu'elle est polarisée en inverse comme sur le schéma de la figure 1, le courant i_2 qui la traverse en sens indirect est proportionnel au flux Φ_r et on note $i_2 = K_r \Phi_r$ où K_r est une constante positive.

6. Exprimer la tension $u_r(t)$ en fonction de $u_e(t)$, V_{sb} , d , r , r_e , s_r , K_e et K_r .

Pour extraire le signal informatif du signal u_r , on réalise le montage de la figure 3 dans lequel A_2 est un amplificateur de tension, tel que $u_{r1} = K u_r$, et M_2 est un multiplieur identique à M_1 . Dans le montage figure également le bloc F constitué d'une résistance r_2 et d'un condensateur de capacité C_2 .

7. Quelle est la fonction du bloc F ? Exprimer sa fonction de transfert et préciser sa pulsation de coupure ω_c en fonction de r_2 et C_2 .

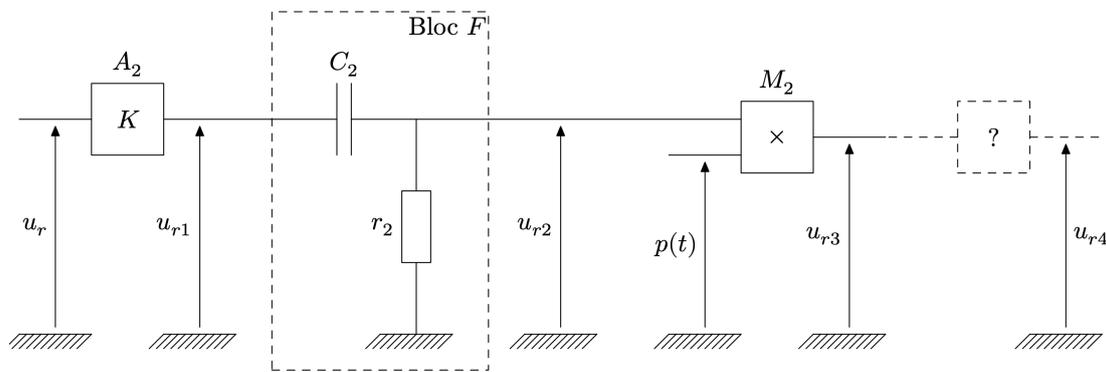


FIGURE 3 – Schéma du circuit d'extraction de l'information à partir de la tension $u_r(t)$

On considère un signal informatif de la forme $a(t) = a_m \cos(\omega_a t)$, tel que $\omega_c \ll \omega_a \ll \omega_p$.

8. Montrer que la tension u_{r3} peut s'écrire sous la forme $u_{r3} = U_{3m} \cos^2(\omega_p t + \alpha_p) \cos(\omega_a t)$; exprimer l'amplitude U_{3m} en fonction des données du problème, puis représenter le spectre du signal u_3 .

9. On souhaite que la tension u_{r4} soit proportionnelle au signal informatif. Proposer un montage pour le bloc inconnu, noté « ? » sur la figure 3.

3 — Débit binaire du LiFi

En pratique, le signal informatif est un signal binaire, dont l'allure qualitative est présentée figure 4 où T_{ck} est la période d'horloge. Pour que la modulation décrite dans la partie I soit correcte, il faut s'assurer que la fréquence d'horloge f_{ck} vérifie la condition $f_{ck} < f_p/100$.

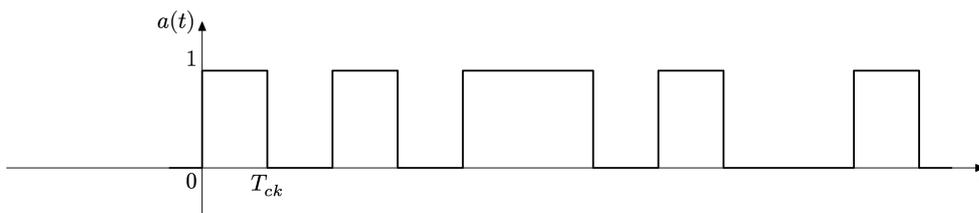


FIGURE 4 – Allure d'un signal informatif pour une transmission binaire

10. Les liaisons Wifi actuelles procurent un débit descendant de l'ordre de $10 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$, obtenu avec des porteuses dont la fréquence est de l'ordre de quelques GHz. Vérifier que la condition d'une bonne modulation est satisfaite.

On considère désormais le cas d'une installation LiFi utilisant des diodes électroluminescentes émettant une lumière bleue de longueur d'onde $\lambda_b = 470 \text{ nm}$ dans le vide.

11. Calculer la fréquence de la porteuse lumineuse. En déduire l'ordre de grandeur de la fréquence de la sous-porteuse qui peut être utilisée pour la technologie LiFi, puis estimer l'ordre de grandeur du débit binaire maximal que l'on peut obtenir avec le LiFi. Commenter.

Données

Vitesse de propagation de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Spectre en amplitude d'un signal créneau de fréquence f (première harmoniques)

