Comportement des diodes vertes au GaP en régime multiplexé. Influence de la température

G. Batailler, P. Garcia, J. Bernard

► To cite this version:

G. Batailler, P. Garcia, J. Bernard. Comportement des diodes vertes au GaP en régime multiplexé. Influence de la température. *Revue de Physique Appliquée*, 1980, 15 (8), pp.1339-1345. 10.1051/rphysap:019800015080133900 . jpa-00244857

HAL Id: jpa-00244857

<https://hal.science/jpa-00244857>

Submitted on 1 Jan 1980

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification
Physics Abstracts
78.60F

Comportement des diodes vertes au GaP en régime multiplexé. Influence de la température

G. Batailler, P. Garcia et J. Bernard

Faculté des Sciences, Laboratoire d'Optoélectronique, 40, avenue du Recteur-Pineau, 86022 Poitiers, Cedex, France.

(Reçu le 25 février 1980, révisé le 29 avril 1980, accepté le 13 mai 1980)

Résumé. — Expérimentalement, les diodes vertes au GaP, N soumises à une excitation multiplexée, présentent un gain de luminance par rapport au fonctionnement statique, à courant moyen constant. Ce gain passe par un maximum pour des valeurs précises des paramètres de la commande, définissant ainsi un réglage optimum pour le multiplexage nécessaire à l'affichage d'informations sur visualisateurs matriciels.

Une approche théorique est proposée à l'aide d'un modèle analytique selon S.N.S. La compétition des courants radiatifs et non radiatifs générés dans les différentes zones de la jonction définit un gain mais ne présentant pas toutefois de maximum.

Ce maximum est mis en évidence par la prise en compte, dans le modèle, de la température effective de fonctionnement. Cette température moyenne, résultat d'un étalonnage préalable effectué sur l'échantillon est fonction croissante du courant crête de l'excitation.

Abstract. — Experimentally the green GaP, N Leds, show a gain of luminescence under multiplexed excitation with respect to static working, with constant average current. This gain presents a maximum for exact values of excitation, and defines the best multiplexing conditions for visualization on matrix displays.

The competition of the radiative and non-radiative currents generated in the different zones of the junction, and defined by an analytical model deduced from the S.N.S. theory, gives a gain, but not showing a maximum.

This maximum can be obtained in considering in the model, the actual working temperature. This average temperature, determined experimentally on the sample, is an increasing function of the crest current of excitation.

Les diodes électroluminescentes utilisées parfois comme voyant indicateur isolé sont en fait souvent associées pour assurer l'affichage d'informations graphiques ou alphanumériques de type tout ou rien, comme c'est le cas pour les structures matricielles à adressage XY [1]. L'optimisation des circuits électroniques de commande nécessite alors l'utilisation de techniques de multiplexage, et une caractérisation préalable du comportement du composant sous excitation multiplexée est alors souhaitable.

Des mesures effectuées sur des diodes commercialisées montrent en effet la présence d'un gain de luminance sous excitation multiplexée par rapport au fonctionnement statique, ceci pour un même courant moyen [2]. De plus, ce gain présente un maximum fonction des matériaux utilisés et des paramètres de l'excitation [3].

Le but du présent article est de préciser expérimentalement les valeurs de ce gain dans le cas de diodes vertes au GaP; N, et plus particulièrement

les coordonnées du maximum qui définissent les conditions optimales de multiplexage.

Un essai de justification de l'allure du gain est également proposé à l'aide d'un modèle analytique selon S.N.S. Notamment, il est montré que la présence du maximum résulte de la prise en compte de la température effective de fonctionnement. L'évaluation de l'autochauffage du composant fonction des paramètres de l'excitation a donc été effectuée. La comparaison des résultats théoriques et expérimentaux a été faite pour un courant moyen de 8 mA, ce qui correspond à un niveau de luminance (130 FL en statique) acceptable pour l'affichage d'informations.

1. Comportement expérimental en régime multiplexé.

— Les échantillons étudiés sont des diodes vertes ($\lambda = 566$ nm) au GaP; N élaborées par la Société RTC Caen dont les caractéristiques principales sont :

— substrat GaP, S sur $110\ \mu\text{m}$

$$(N_D - N_A \simeq 5 \times 10^{23}\ \text{m}^{-3}),$$

— couche épitaxiale de GaP en phase liquide sur $40\ \mu\text{m}$ (dopage S : $N_D - N_A \simeq 1,7 \times 10^{23}\ \text{m}^{-3}$; dopage N : $8 \times 10^{24}\ \text{m}^{-3}$ sur $25\ \mu\text{m}$),

— diffusion de Zn à $620\ ^\circ\text{C}$ sur $7\ \mu\text{m}$ (dopage moyen $3 \times 10^{24}\ \text{m}^{-3}$),

— électrode $\text{Au}(\text{Si})_N/\text{Au}(\text{Be})_P$; surface de la jonction $2 \times 10^{-7}\ \text{m}^2$. Ces échantillons sont montés nus sur boîtier T 08.

Un circuit électronique permet d'exciter ces diodes par un signal impulsionnel périodique, de courant de crête et de rapport cyclique variables. Le courant moyen est maintenu constant quels que soient les réglages; il a été fixé pour cette étude à $8\ \text{mA}$.

L'émission lumineuse moyenne est déduite de mesures effectuées à l'aide d'un photomètre à grande sensibilité. Pour un même courant moyen, cette émission est inchangée lorsque la fréquence d'excitation varie de $50\ \text{Hz}$ à $5\ \text{kHz}$; elle est réglée à $100\ \text{Hz}$. Les autres conditions expérimentales sont les suivantes :

— courant de crête (I_c) variable de $8\ \text{mA}$ (régime statique) à $1\ \text{A}$,

— rapport cyclique (τ) réglable en conséquence de 1 à 8×10^{-3} , d'où des durées d'impulsions variant entre $10^{-2}\ \text{s}$ et $8 \times 10^{-5}\ \text{s}$.

Fig. 1. — Luminance moyenne expérimentale en fonction du rapport cyclique à courant moyen constant ($8\ \text{mA}$).

[Average experimental luminescence as a function of duty cycle for constant average current ($8\ \text{mA}$).]

Des mesures de la luminance moyenne exprimée en FL montrent d'après la figure 1, que celle-ci croît lorsque le rapport cyclique diminue, passe par un maximum pour τ avoisinant 3×10^{-2} avant de décroître pour des valeurs de τ plus petites. Ce maximum correspond à un courant de crête d'environ $250\ \text{mA}$.

Dans ces conditions un gain de luminance défini par le rapport : luminance moyenne/luminance statique $G = (L_{\text{moy}}/L_{\text{st}})$ peut donc être précisé (courbe expérimentale des figures 5 et 9) le gain maximum avoisinant 1,8. Il est à noter que des mesures similaires effectuées pour d'autres courants moyens (de $1\ \text{mA}$ à $20\ \text{mA}$) confirment la présence d'un tel maximum, dont la valeur absolue est fonction du courant de référence.

Le cas d'un courant de $8\ \text{mA}$ est significatif du comportement du gain, et il permet par ailleurs d'approcher pour un réglage optimum les conditions nominales habituellement retenues pour un niveau de luminance acceptable ($10\ \text{mA}$ à $20\ \text{mA}$ en régime statique).

2. Gain de luminance théorique en régime multiplexé.

— 2.1 MODÈLE ANALYTIQUE UTILISÉ. — De façon simple, deux centres de recombinaisons, l'un profond responsable du courant non radiatif, l'autre superficiel attribué à l'azote et définissant l'émission lumineuse peuvent être retenus pour traduire le comportement optoélectronique des diodes vertes au GaP.

Le modèle analytique envisagé applique à ces centres, répartis de façon homogène, le formalisme de Sah, Noyce et Shockley avec les hypothèses s'y rattachant [4], [5], [6], et définit dans le cas d'une jonction supposée abrupte les courants non radiatifs I et radiatifs L générés dans les trois régions de la diode (N, P et zone de charge d'espace Z) pour le domaine d'excitation envisagé ($1\ \text{V}$ à V_D) selon les formulations suivantes :

— Courant non radiatif :

$$I = I_N + I_P + I_Z$$

avec :

$$I_N = S(qkT\mu_{pN}/\tau_{pN,r})^{+1/2} \Delta p_N$$

$$I_P = S(qkT\mu_{nP}/\tau_{nP,r})^{+1/2} \Delta n_P$$

$$I_Z = \frac{2qAS}{F\sqrt{-K}} \left(\arctan \frac{G}{\sqrt{-K}} - \arctan \frac{H}{\sqrt{-K}} \right).$$

— Courant radiatif :

$$L = L_N + L_P + L_Z$$

avec :

$$L_N \simeq \frac{\tau_{pN,r}}{\tau_{pN}(1 + n_r/\bar{n}_N)} \cdot I_N$$

$$L_P \simeq \frac{\tau_{nP,r}}{\tau_{nP} + \tau_{pP} \frac{n_r}{\bar{p}_P}} \cdot I_P$$

$$L_Z = \frac{qAS}{F\sqrt{K}} \text{Log} \left[\frac{(G - \sqrt{K})(H + \sqrt{K})}{(G + \sqrt{K})(H - \sqrt{K})} \right]$$

où Δp_N et Δn_p représentent l'excès des porteurs minoritaires aux frontières de la zone de charge d'espace :

$$\Delta p_N = \frac{\bar{p}_p \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) \right] + \bar{n}_p \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]}{\frac{\bar{n}_N}{\bar{n}_p} \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) - \frac{\bar{p}_N}{\bar{p}_p} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)}$$

$$\Delta n_p = \frac{\bar{n}_N \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) \right] + \bar{p}_N \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]}{\frac{\bar{p}_p}{\bar{p}_N} \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) - \frac{\bar{n}_p}{\bar{n}_N} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)}$$

avec V : tension appliquée à la zone de charge d'espace, supposée s'identifier à la tension de commande.

Les différents paramètres intervenant dans ces expressions sont définis en annexe. Les indices « n.r » et « r » se réfèrent respectivement aux centres non radiatif et radiatif ; ainsi les paramètres intervenant dans L_z sont similaires à ceux de I_z à condition de changer les indices.

Pour les valeurs des paramètres technologiques des échantillons étudiés, une étude phénoménologique en régime statique selon [7], notamment la coïncidence des caractéristiques expérimentale et théorique $I(V)$ à bas niveau d'injection ($V = 1,564$ V, $I = 40$ μ A) (Fig. 2), et les coordonnées du point de cassure de la courbe $L(I)$: $I_i = 4$ mA, soit une tension expérimentale $V = 1,88$ V (Fig. 3) per-

Fig. 2. — Caractéristique courant-tension : ● expérimentale ; — théorique, calculée pour une température constante $T = 295$ K. La correspondance théorie-expérience a été prise pour $I = 40$ μ A et $V = 1,564$ V.

[Current voltage characteristic : ● experimental ; — theoretical, calculated for a constant temperature $T = 295$ K. The theory fits experience for $I = 40$ μ A and $V = 1,564$ V.]

Fig. 3. — Caractéristiques luminance-courant, indicée en tension pour l'expérience, et théorique pour une température constante $T = 295$ K. Les cassures des asymptotes correspondent à un courant de 4×10^{-3} A ; leurs comportements à bas niveau sont identiques.

[Current luminescence characteristics, indexed with tension for experience, and theoretical for a constant temperature $T = 295$ K. The knees of the asymptotes are for current equal to 4×10^{-3} A ; their behaviours are the same for low level.]

mettent de définir des ordres de grandeur pour les paramètres intervenant dans les écritures de ces courants ($\tau_{p_{n,r}} = 8 \times 10^{-10}$, $\tau_{n_{n,r}} = 8 \times 10^{-11}$, $\tau_{p_r} = 2 \times 10^{-6}$, $\tau_{n_r} = 2 \times 10^{-6}$).

Il en résulte un rendement statique externe (η_s) défini par le rapport L/I dont l'évolution en fonction du niveau d'injection est donnée en figure 4.

L'accroissement important à bas niveau d'injection de η_s s'explique par le fait que dans ce domaine le courant est généré dans la zone de charge d'espace suivant une loi $I_z = K_1(V_D - V)^{-1/2} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right)$ et que la composante de lumière générée dans la zone N

Fig. 4. — Rendement statique en fonction du niveau d'injection : ● expérimental, — théorique calculé à température constante $T = 295$ K.

[Static efficiency as a function of degree injection : ● experimental ; — theoretical calculated for a constant temperature $T = 295$ K.]

est prédominante [$L_N \simeq 4(L_P + L_Z)$] suivant une loi $L_N = K_2 \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$ d'où

$$\eta_S = K'(V_D - V)^{1/2} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right).$$

Par contre à haut niveau d'injection, le courant étant cette fois-ci généré comme la lumière dans la zone N [$I_N \simeq 6(I_P + I_Z)$], le rendement tend vers une valeur constante $\frac{\tau_{pn,r}}{\tau_{pr}\left(1 + \frac{n_r}{n_N}\right)}$.

L'évolution de ce rendement est vérifiée expérimentalement jusqu'à des tensions appliquées de l'ordre de 1,9 V (6 mA), au-delà il s'écarte de la théorie pour chuter à plus fort niveau d'injection (Fig. 4).

2.2 GAIN DE LUMINANCE. — Dans ces conditions, l'exploitation du rapport L/I calculé pour $T = 295$ K de la figure 8 permet d'évaluer un gain de luminance sous excitation multiplexée, par comparaison du rendement statique et du rendement dynamique. Le rendement statique est défini par le rapport luminance statique/courant statique :

$$\eta_s = \frac{L_{st}}{I_{st}}$$

et le rendement dynamique comme le rapport luminance moyenne/courant moyen :

$$\eta_d = \frac{L_{moy}}{I_{moy}}.$$

Ce dernier sera pris égal au rapport luminance crête/courant crête ($L_{moy} = L_c \times \tau$; $I_{moy} = I_c \times \tau$), ceci supposant la constance de la luminance pendant l'application du créneau de l'excitation.

En effet, pour un rapport cyclique et un courant moyen donnés, les mesures de la luminance moyenne sont inchangées lorsque les largeurs d'impulsions varient dans un rapport 100, comme cela a été vérifié pour une gamme de fréquence d'excitation de 50 Hz à 5 kHz. Il en résulte que le déclin de luminance sensible en réponse indicielle n'apparaît pas de façon sensible pour les largeurs d'impulsion envisagées ici (ce qui justifie l'hypothèse retenue précédemment).

Ainsi, le gain de luminance défini par le rapport luminance moyenne/luminance statique :

$$G = L_{moy}/L_{st}$$

peut s'écrire

$$G = \frac{L_{moy}}{I_{moy}} \cdot \frac{I_{st}}{L_{st}} = \frac{\eta_d}{\eta_s}$$

puisque $I_{st} = I_{moy} = 8$ mA = le courant de référence.

Fig. 5. — Gain de luminance en fonction du rapport cyclique pour $I_{moy} = 8$ mA, ● expérimental ; — théorique calculé à température constante $T = 295$ K.

[Gain of luminescence as a function of duty cycle for $I_{moy} = 8$ mA, ● experimental ; — theoretical for $T = 295$ K.]

Ce gain est donné en figure 5, il atteint environ 2,2 pour $I_c = 1$ A ; son évolution est monotone et ne présente pas de maximum comme l'expérience.

Cette différence de comportement conduit à considérer la température effective de fonctionnement, paramètre influençant notablement les résultats du modèle analytique.

3. Prise en compte de la température de fonctionnement.

3.1 EVALUATION EXPÉRIMENTALE DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE EFFECTIVE. — L'autochauffage du composant est fonction du niveau d'injection et du type de commande (statique ou multiplexée).

L'évaluation de cet autochauffage est faite par analogie : pour un point de fonctionnement où l'autochauffage est supposé négligeable (très faible injection), l'étude du régime établi pour différents points de consigne de la température ambiante, donc de la température interne, permet un étalonnage du courant circulant dans la diode alimentée à tension constante.

Dans ces conditions, la température de fonctionnement résultant d'un autochauffage dû à des conditions d'excitation quelconques peut être déterminée, après obtention d'un régime permanent, par retour à la commande bas niveau de référence. L'analogie entre le courant immédiat de retour et celui de l'étalonnage préalable traduit la température moyenne interne du composant.

Le point de référence est fixé à $V = 1,484$ V où à température ambiante, le courant vaut 10μ A. La diode étant placée dans un four régulé, l'évolution de ce courant sous tension d'excitation constante en fonction de la température est relevée.

La diode est ensuite soumise, à température ambiante à l'excitation impulsionnelle définie précédemment ($I_{moy} = 8$ mA, rapport cyclique variable). Pour chaque réglage la valeur du courant lors du retour rapide à la position de référence est mémo-

Fig. 6. — Température effective de fonctionnement en fonction du rapport cyclique pour un courant moyen de 8×10^{-3} A.

[Actual working temperature as a function of duty cycle for a average current equal to 8×10^{-3} A.]

risée. (Le temps de commutation est négligeable par rapport à la constante de temps thermique de l'échantillon étudié, constante de temps évaluée à environ 30 s.) Sa valeur définit la température correspondante. Comme le montre la figure 6, cette dernière est d'autant plus élevée que le courant crête est important et atteint $T = 325$ K pour $\tau = 8 \times 10^{-3}$.

D'autre part, l'autochauffage résultant de courants continus (jusqu'à 100 mA) a été caractérisé selon la même méthode (Fig. 7).

3.2 INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LE GAIN THÉORIQUE. — Parmi les paramètres intervenant dans

$$E_g = 2,338 - 6,2 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T + 460}$$

$$\mu_{pN} = 39 T^{-3/2}$$

Il en résulte un réseau définissant les rendements théoriques, en fonction du niveau d'injection, calculés pour différentes températures constantes (295 K à 380 K). Il y est montré que pour un niveau d'injection donné, le rendement est d'autant plus faible que la température est élevée.

Ce réseau et les courbes d'étalonnage en température élaborées précédemment en régime multiplexé et continu (Figs. 6 et 7) permettent de définir les rendements théoriques dynamiques (η_d) et statiques (η_s) en fonction du niveau d'injection et de la température évolutive : par exemple, pour un point de fonctionnement en régime multiplexé correspondant à un courant moyen de 8 mA et un rapport cyclique de 8×10^{-3} , conduisant à un courant de crête de 1 A, la figure 6 indique une température effective de fonctionnement de 325 K ; dans ce cas le rendement dynamique théorique sera donc défini par la courbe

Fig. 7. — Température effective de fonctionnement en régime statique.

[Actual working temperature under static excitation.]

la définition des courants radiatif et non radiatif, seuls ceux indiqués ci-dessous ont été retenus comme étant notablement influencés par la température, (température supposée spatialement homogène), ceci selon les dépendances de la forme [8], [9], [10] :

$$n_i = 2 \times 10^{22} T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

$$\mu_{np} = 31,2 T^{-3/2}.$$

de rendement calculé à 325 K et pour un courant de 1 A. Ce rendement pour tout le domaine d'utilisation envisagé, s'obtient en opérant de la même manière pour différents points de fonctionnement. Un raisonnement analogue avec les courbes des figures 7 et 8 conduit à l'établissement du rendement statique théorique.

Ces rendements se traduisent par les courbes A et C de la figure 8 qui montrent que la prise en compte de la température conduit à des rendements qui, non seulement croissent moins vite que le rendement non corrigé (295 K) mais chutent à haut niveau d'injection. La chute du rendement statique est par ailleurs plus marquée que celle du rendement dynamique du fait d'un autochauffage plus important.

A titre de comparaison, le rendement statique expérimental a été reporté en figure 8 (courbe B). Les évolutions des courbes B et C sont semblables ;

Fig. 8. — Rendement statique théorique en fonction du degré d'injection calculé pour plusieurs températures. B : rendement statique expérimental. C : rendement statique théorique. A : rendement dynamique théorique pour un courant moyen de 8 mA.

[Theoretical static efficiency as a function of degree injection, calculated for many temperatures. B : experimental static efficiency. C : theoretical static efficiency. A : theoretical dynamic efficiency for an average current equal to 8 mA.]

cependant les valeurs absolues des rendements diffèrent au-delà de 10 mA. Cet écart peut être imputé à la dépendance de la profondeur du centre de recombinaison radiatif vis-à-vis de la température ; $E_g - E_r$,

Fig. 9. — Gain de luminance en fonction du rapport cyclique pour $I_{\text{moy}} = 8$ mA, ● expérimental ; — théorique avec prise en compte de la température de fonctionnement.

[Gain of luminescence as a function of duty cycle for $I_{\text{moy}} = 8$ mA, ● experimental ; — theoretical taking into account the actual average working temperature.]

a été prise ici constante dans tout le domaine concerné et égale à 0,076 eV.

L'exploitation de la courbe A de la figure 8 définit donc, pour un courant moyen de 8 mA, le gain de luminance théorique (η_d/η_s à 8 mA) qui présente cette fois un maximum du fait de l'intervention de la température moyenne. Ce maximum (Fig. 9) avoisine 1,72 pour un rapport cyclique de 3×10^{-2} , alors que le maximum expérimental est de l'ordre de 1,8. Ces maxima correspondent à un même courant crête ($I_c = 250$ mA).

La position de ce maximum préconise donc le multiplexage d'un visualisateur dont la dimension est de l'ordre de 32 diodes ; chaque diode est soumise à un courant de crête de 250 mA et délivre donc une luminance moyenne de 240 FL.

4. Conclusion. — Cette étude montre que, malgré la simplicité du modèle utilisé, l'exploitation de la courbe de rendement théorique corrigée en température permet une approche du gain expérimental. Notamment la chute de ce gain observée pour de faibles rapports cycliques apparaît donc comme résultant d'un autochauffage important pour ces conditions d'utilisation, bien que la température ne soit pas le seul paramètre à prendre en considération.

Ainsi, une généralisation de l'étude précédente à d'autres types de diodes nécessiterait, outre la caractérisation du matériau (saturation éventuelle à haut niveau d'injection), l'étude des conditions d'élaboration de la diode (boîtier, enrobage, diode isolée ou agencement de points...) qui déterminent le comportement thermique du composant.

Cette étude est par ailleurs nécessaire pour définir la taille optimale du visualisateur permettant de bénéficier du gain maximum. Ce maximum est fonction des paramètres de l'excitation et notamment de la valeur du courant moyen du fait d'un autochauffage différent.

Des travaux en cours tendent à préciser les conditions d'une commande optimale (influence du courant moyen, du niveau de luminance, du taux de multiplexage, de la taille d'écran) en vue de l'obtention d'une image présentant différents niveaux de gris sur écran matriciel à diodes électroluminescentes.

Remerciements. — Nous remercions la Société RTC Caen qui nous a fourni les échantillons sur lesquels a porté cette étude.

ANNEXE

1. Paramètres technologiques des échantillons.

$x_N = 33 \times 10^{-6}$ m longueur de la région N.
 $x_P = 7 \times 10^{-6}$ m longueur de la région P.
 $\bar{n}_N = 1,7 \times 10^{23}$ m⁻³ concentration des porteurs majoritaires côté N.

$\bar{p}_P = 3 \times 10^{24}$ m⁻³ concentration des porteurs majoritaires côté P.
 $n_i = 4,43 \times 10^6$ m⁻³ concentration intrinsèque du GaP à 295 K.
 $\bar{n}_P = n_i^2/\bar{p}_P$ concentration des porteurs minoritaires côté P.

$\bar{p}_N = n_i^2/\bar{n}_N$	concentration des porteurs minoritaires côté N.	$E_{n,r} = 1,16 \text{ eV}$	niveau énergétique du centre non radiatif à 295 K.
$S = 2 \times 10^{-7} \text{ m}^2$	surface de la jonction.	$E_r = 2,19 \text{ eV}$	niveau énergétique du centre radiatif à 295 K.
$\varepsilon = 8,85 \times 10^{-11} \text{ F/m}$	permittivité du GaP.	$T = 295 \text{ K}$	température ambiante.
$E_g = 2,266 \text{ eV}$	bande interdite du GaP à 295 K.		

2. Définition des courants

$$V_D = \frac{kT}{q} L_n \left(\frac{\bar{n}_N \bar{p}_N}{n_i^2} \right)$$

$$F = \frac{q}{kTW} (V_D - V)$$

$$W = x_N + x_P \quad \text{avec} \quad x_N = \left[\frac{2\varepsilon}{q} \frac{\bar{p}_P}{\bar{n}_N(\bar{n}_N + \bar{p}_P)} (V_D - V) \right]^{1/2}$$

$$x_P = \left[\frac{2\varepsilon}{q} \frac{\bar{n}_N}{\bar{p}_P(\bar{p}_P + \bar{n}_N)} (V_D - V) \right]^{1/2}$$

$$G = 2 C_{n,r} + B_{n,r}$$

$$H = 2 C_{n,r} \exp(-FW) + B_{n,r}$$

$$K = B_{n,r}^2 - 4 C_{n,r} D_{n,r}$$

$$B_{n,r} = \tau_{p_{n,r}} n_{n,r} + \tau_{n_{n,r}} p_{n,r}$$

$$n_{n,r} = n_i \exp \frac{E_{n,r} - E_i}{kT} \quad p_{n,r} = n_i \exp \frac{E_i - E_{n,r}}{kT}$$

$$A = [C_{n,r} D_{n,r} / \tau_{p_{n,r}} \tau_{n_{n,r}}] - n_i^2$$

$$C_{n,r} = \frac{\bar{p}_P - \bar{n}_P \left[\frac{\bar{p}_P \bar{n}_N}{\bar{p}_N} - \bar{p}_P \right] \exp \left(-\frac{qV}{kT} \right)}{\frac{\bar{p}_P}{\bar{p}_N} \exp \left(-\frac{qV}{kT} \right) - \frac{\bar{n}_P}{\bar{n}_N} \exp \left(\frac{qV}{kT} \right)} \tau_{p_{n,r}}$$

$$D_{n,r} = \frac{\bar{p}_P - \bar{n}_P \left[\bar{n}_P - \frac{\bar{n}_P \bar{p}_N}{\bar{n}_N} \right] \exp \left(\frac{qV}{kT} \right)}{\frac{\bar{n}_N}{\bar{n}_P} \exp \left(-\frac{qV}{kT} \right) - \frac{\bar{p}_N}{\bar{p}_P} \exp \left(\frac{qV}{kT} \right)} \tau_{n_{n,r}}$$

Bibliographie

- [1] BATAILLER, G., BERNARD, J., BESSE, J. C., GARCIA, P., Technique logique de commande et animation de structures matricielles électroluminescentes. *Revue Phys. Appl.* **8** (1973).
- [2] AHRONS, R. W., Strobed Led displays. *Electronics*, **44** (1971).
- [3] BERNARD, J., BONNET, C., GARCIA, P. Contrat DRME n° 74/589, synthèse d'une image à luminosité variable sur écran matriciel à diodes électroluminescentes. Juin 1976.
- [4] VASSILIEFF, G., CHEVALIER, J. and MARIETTE, H., Recombination kinetics of the excitons in GaP : N electroluminescent diodes. *Solid State Electron.* **21** (1978) 403-407.
- [5] SHOCKLEY, W. and READ, W. T. Statistics of the recombinations of holes and electrons. *Phys. Rev.* **87** (1952).
- [6] SAH, C. T., NOYCE, R. N., SHOCKLEY, W., Carrier generation and recombination in P. N. junctions and PN junctions characteristics. *Proceeding of the IRE* **45** (1957) 1228.
- [7] BATAILLER, G., BERNARD, J., GARCIA, P., Influence des durées de vie sur les caractéristiques statiques modélisées de diodes vertes au GaP. *Revue Phys. Appl.* **14** (1979) 587-594.
- [8] GERSHENZON, M., LOGAN, R. A. and NELSON, D. F. Electrical and electroluminescent properties of gallium phosphide diffused P.N. Junctions. *Phys. Rev.* **149** (1966).
- [9] GOOCH, Ch., *Injection electroluminescent devices* (John Wiley and sons) 1973.
- [10] HILSUM and ROSE-INNES, A. C., *Semiconducting III-V compounds* (Pergamon Press) 1961.
BERGH, A. A. and DEAN, P. J., *Light emitting diodes* (Clarendon Press) 1976.
SZE, S. M., *Physics of semiconductor devices* (Wiley) 1969.