

ETUDE DES EFFETS THERMIQUES DANS UN COMMUTATEUR A BASE DE GUIDE D'ONDE GAAS (REF:39/3)

T.Bouchemat', Z.A1-kinanil', M.Bouchemat', F.Hamdi', S.Lebied', F.Youla', F.Brik', N.Paire², F.Bertrand¹
1-Département d'Électronique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur- Université Mentouri Constantine, Algérie.

Tél.: (213) 031 61 42 07- Fax.: (213) 031 61 42 06

E-mail : zaineb.al-kinani@caramail.com

2-Institut d'électronique fondamentale, CNRS URA 22, BAT. 220, Université paris sud, 91405 ORSAY cedex,
France.

RESUME

Ce présent travail consiste à étudier l'influence des effets thermiques lors du fonctionnement des composants commutateurs en tout optique. Le dispositif à étudier consiste en un guide d'onde en GaAs, muni d'un coupleur à réseau de diffraction. La couche guidante se trouve sur un miroir de Bragg GaAs/ AlAs et fonctionne en réflexion. Afin de prévoir le fonctionnement de ces dispositifs en régime non linéaire, nous avons développé un modèle de simulation qui permet d'étudier, dans un premier temps en régime stationnaire, la répartition de la température dans la structure considérée. Nous avons également analysé l'importance relative de l'échauffement induit par l'absorption optique dans la structure.

Dans un second temps et afin de prévoir la période de répétition minimale de l'impulsion lumineuse en régime dynamique, nous évaluons le temps d'évacuation de la chaleur après coupure de l'éclairage.

Mots clés : Guide d'onde, réseau de diffraction, Commutation, Effets thermiques, Non-linéarités optiques.

1- INTRODUCTION

Les semi-conducteurs III-V ont connu un développement très important durant ces vingt dernières années, surtout après l'apparition des technologies basées principalement sur ces matériaux, comme les FET GaAs, les lasers, ainsi que les diodes électroluminescentes. Ces matériaux, et en particulier l'arséniure de gallium, sont en général susceptibles de donner des performances de rapidité de traitements des signaux électriques supérieurs à ceux du silicium [1].

Le but de notre étude et d'étudier la répartition de la température dans un commutateur optique et cela afin de l'adapter à différentes applications possibles, telle que commutation, photo détection, porte logique, etc.

Il s'agit d'un commutateur dont le composant de base est un guide d'ondes GaAs avec coupleur à réseau de diffraction. Sous le guide se trouve un réflecteur de Bragg, qui permet de travailler en transmission [2].

Le GaAs est légèrement absorbant à la longueur d'ondes $0,867\mu\text{m}$, la lumière guidée génère des paires électrons trous dans le film, et la présence de porteurs modifie l'indice de réfraction induisant des effets non linéaires d'origine électronique. Les recombinaisons intrabandes de ces porteurs ainsi que leur thermalisation se font avec émissions de phonons, qui échauffent le réseau et modifient également l'indice de réfraction, ce sont les effets non linéaires thermiques [3]. Ces deux effets sont antagonistes. Pour obtenir un commutateur rapide, on veillera à favoriser les effets électroniques qui sont les plus rapides et minimiser les effets thermiques.

Notre travail consiste à développer un programme de simulation qui traite la répartition et la diffusion de la température dans le composant, nous avons calculé par une méthode aux différences finies la carte de température dans le dispositif en régime stationnaire dans le temps.

Nous avons ainsi évalué l'importance des effets thermiques afin de les minimiser.

2- PRESENTATION DU DISPOSITIF

Notre structure utilise les matériaux GaAs comme constituant de la couche active ($0,65\mu\text{m}$). Sur un substrat d'arséniure de gallium (GaAs) non intentionnellement dopé (n. i. d) est épitaxié un réflecteur de Bragg constitué de 15,5 paires (AlAs/ GaAs) d'épaisseur ($0,73/0,60\mu\text{m}$). La couche supérieure en GaAs (n.i.d) constitue le guide d'onde non linéaire. Le réflecteur de Bragg isole le guide du substrat qui est de même nature physique (et possède donc le même indice de réfraction) (figure1)[4]. Ce composant est prévu pour travailler à une longueur d'onde de 880 nm légèrement supérieure au bord de bande de GaAs ($\lambda_g=0,867\mu\text{m}$ à la température ambiante).

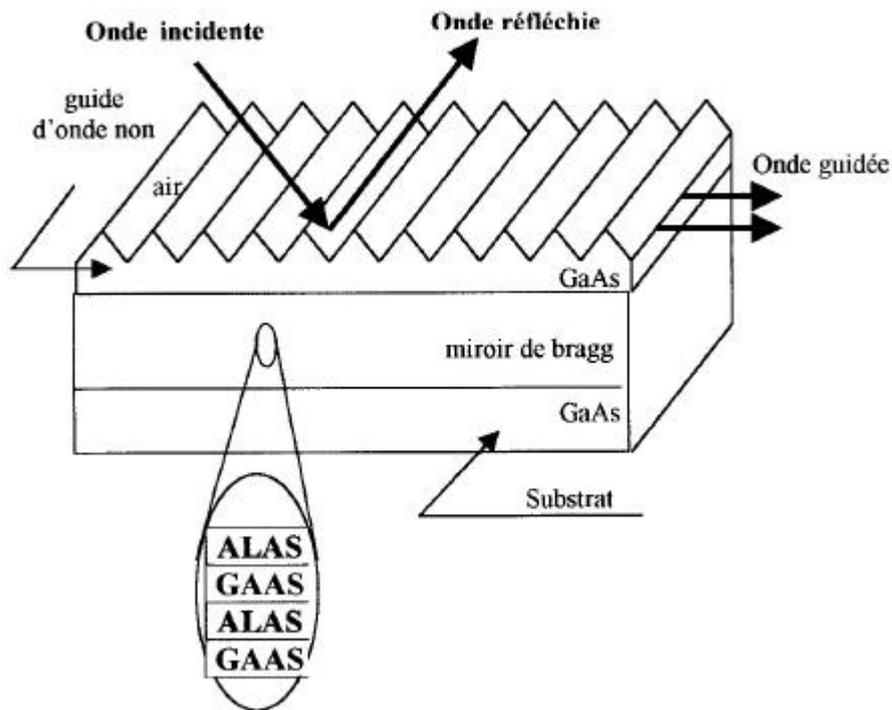


Figure: : *Schéma du dispositif*

Ce dispositif est un commutateur, dont le fonctionnement est basé sur les non linéarités électronique et thermique. [2].

Pour coupler l'énergie d'un faisceau lumineux dans un guide d'onde on distingue trois méthodes : couplage par focalisation à l'extrémité du guide [3,5], couplage par prisme [3.5] et couplage par réseau de diffraction. Dans notre étude nous adopterons le couplage par réseau car cette méthode présente de nombreux avantages, elle est monolithique, sélective et reproductible.

Cette technique consiste à graver un motif périodique à la surface du film guidant, les traits du réseau sont perpendiculaires à la direction de propagation (OZ).

La périodicité A du motif est appelée pas du réseau. L'épaisseur du réseau h gravée à partir de l'interface (Air/Silicium) est appelée profondeur de modulation du réseau. Ce réseau de diffraction est optimisé pour coupler un maximum de lumière dans le guide monomode.

3-FONCTIONNEMENT DU COMMUTATEUR OPTOELECTRONIQUE-MODELISATION EN REGIME STATIONNAIRE

Quand on éclaire le dispositif à l'aide d'une intensité de puissance incidente I_i , une partie de la lumière est réfléchie vers l'extérieur et l'intensité réfléchie est proportionnelle à I_i , le facteur de proportionnalité est la réflectance R est tel que:

$$I_r = R \cdot I_i.$$

La partie de l'énergie lumineuse couplée dans le guide est absorbée, elle est également proportionnelle à l'intensité incidente telle que

$$I_a = A \cdot I_i.$$

A étant l'absorbance de la couche guidante. Ces paramètres vérifient la relation de l'unicité:

$$A + R = 1$$

Le fonctionnement du commutateur optoélectronique est basé essentiellement sur l'établissement d'effets non linéaires dans le guide d'onde éclairé en bord de bande d'absorption. Ces effets non linéaires résultent d'une part de la photocréation de porteurs lors de l'irradiation du composant, il s'ensuit une diminution de l'indice de réfraction et on parle d'effets électroniques. D'autre part la recombinaison des porteurs en excès entraîne un échauffement du composant avec augmentation de l'indice de réfraction, c'est les effets thermiques.

En régime linéaire de fonctionnement (faible puissance d'éclairage), la puissance absorbée par le guide en fonction de l'angle d'incidence du faisceau lumineux présente une résonance liée à l'excitation du mode fondamental, L'angle de résonance est noté θ_r .

Le commutateur doit fonctionner en régime non linéaire où on se place hors résonance (valeur faible de l'absorptance), ainsi quand on augmente la densité de puissance lumineuse, il y a création de porteurs, ce qui diminue l'indice de réfraction occasionnant une augmentation de la puissance absorbée par le guide. Par conséquent il en résulte une élévation brutale de l'absorptance qui passe d'une valeur faible à une valeur élevée. On parle de commutation brutale qui apparaît au delà d'un certain seuil de lumière. La recombinaison de ces porteurs entraîne un échauffement du guide avec élévation de l'indice de réfraction et diminution de l'absorptance.

Les deux effets non linéaires thermiques et électroniques qui sont antagonistes sont en compétition permanente. Or le commutateur optoélectronique doit satisfaire à des critères de rapidité et de sensibilité. Il faut donc favoriser l'effet électronique qui est le plus rapide et étudier les possibilités de réduction de l'échauffement pour préserver les performances du composant.

Lorsqu'on envoie un faisceau incident qui éclaire toute la largeur du guide, ce dernier se transforme en source de chauffage par absorption optique, et la chaleur diffuse dans la structure. Il faut donc résoudre l'équation de diffusion de la chaleur dans les différents milieux du système, en tenant compte de la continuité du flux de chaleur normale aux interfaces entre les milieux considérés. L'équation classique de la diffusion de la chaleur est donnée par [6] :

$$\frac{\partial T}{\partial t}(\vec{r}, t) - D_{th} \Delta(\vec{r}, t) = \frac{S(\vec{r}, t)}{C_v} \quad (1)$$

où : $D_{th} = \frac{K}{C_v}$ est le coefficient de diffusion thermique.

En régime stationnaire dans le temps

$$\frac{\partial T}{\partial t}(\vec{r}, t) = 0 \quad (2)$$

Les méthodes de résolution de l'équation de diffusion de la chaleur sont nombreuses, on peut citer par exemple la méthode classique de la résolution des équations aux dérivées partielles par la méthode d'Euler implicite [7], la méthode de l'ADI [8]. Dans notre cas la méthode choisie est celle des différences finies, car elle s'adapte parfaitement aux milieux stratifiés.

La méthode choisie consiste à transformer l'équation de la chaleur et les conditions aux limites en un système d'équations aux différences finies [9], qui seront résolues dans un espace bidimensionnel.

Les équations relatives à l'ensemble des noeuds forment un système linéaire de n équations à n inconnues T(i,j).

Ce système d'équations se résout à l'aide de la méthode de relaxation de Gauss Seidel [10]. Cette méthode qui supprime l'inversion matricielle donc économise le temps de calcul, est particulièrement adaptée à la résolution des systèmes comportant un grand nombre d'inconnues.

De manière générale la température T à l'itération n+1 peut s'écrire :

$$T^{n+1} = T^n(1 - W) + WT^{n+1} \quad (3)$$

W étant le facteur de surrelaxation, dans la simulation sa valeur est choisie de manière à accélérer la convergence, on procède pour cela par essais successifs.

Afin d'étudier l'évolution de la température dans le matériau Ga As, il est essentiel de connaître l'origine des différentes sources de production de la chaleur.

- Les différents processus qui contribuent à produire de la chaleur dans notre dispositif sont:
 - La recombinaison Auger (pour chaque paire électron-trou recombinaison, une énergie E_g est transformée en chaleur et contribue à échauffer le réseau par relaxation des porteurs libres).
 - La thermalisation des porteurs libres échauffés par absorption d'un photon via la relaxation rapide des porteurs chauds.

Donc la source de chaleur est donnée par:

$$S_R(t) = E_g \left(\eta \frac{dN(t)}{dt} \right) + (1 - \eta) \frac{A_{si}(t) \cos(\theta_i)}{e_{si}} I_i(t) \quad (4)$$

η : étant le rendement quantique dépendant du temps, à travers la variation du nombre de porteur

I_i : est l'intensité lumineuse incidente.

α est représenté le coefficient de recombinaison Auger et E_g représente la largeur de la bande interdite.

3-1-Évolution spatiale de la température dans la structure sous éclairement 3-1-1-Éclairément sur toute la surface du guide

Nous avons simulé le dispositif soumis à un éclairément permanent de longueur d'onde $\lambda=0.87\mu\text{m}$ (longueur d'onde du laser *Nd:Yag*), où les valeurs de A et R sont respectivement (0.93, 0.07) [2].

Nous étudions la variation de la température pour différentes valeurs de la densité de puissance incidente H_{in} .

La figure 2 illustre la distribution de la température latéralement et en profondeur à travers toute la structure, pour la valeur de la densité de puissance incidente H_{in} , $500\text{w}/\text{cm}^2$.

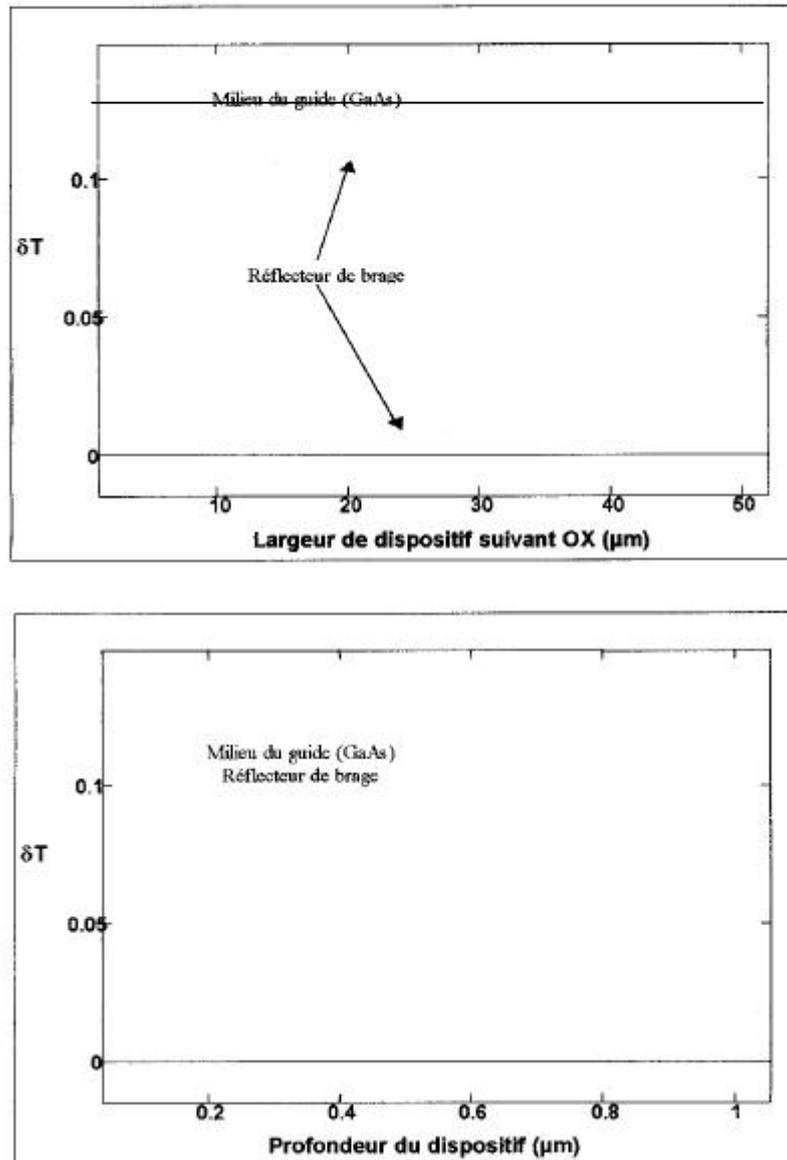


Figure 2: *Evolution de la température dans la structure éclairée sur toute la surface*

Latéralement on remarque que la variation de la température est uniforme. Le maximum de cette variation obtenu au centre du ruban chauffée dT_{\max} vaut 0.13K et reste quasiment constant.

En profondeur on remarque que quand on s'éloigne de la zone chauffée, c'est à dire quand on atteint le miroir de Bragg, la température diminue progressivement, d'une couche de GaAs à l'autre. On notera ici que la diffusion de la chaleur est plus importante en profondeur que latéralement.

L'évolution de la température en fonction de la densité de puissance incidente est donnée sur la figure 3 : dT_{\max} augment linéairement quand la densité de puissance augmente et vaut respectivement dT (0.13, 0.27, et 1.35)°K, pour différentes valeurs des densités de puissance considérées (0.5, 1, et 5 kw/cm^2).

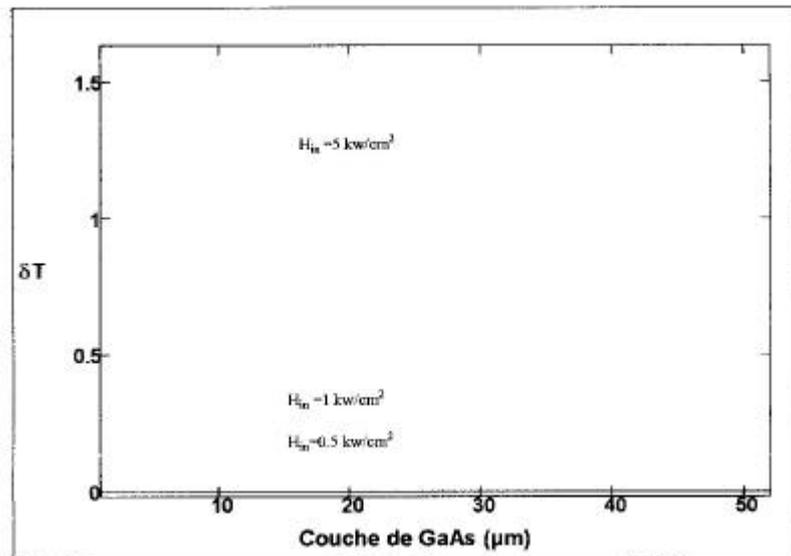


Figure 3 : Evolution de la température en fonction de la densité de puissance

3-1-2- Eclairage sur la demi de la surface

La surface éclairée est maintenant divisée par deux par rapport au cas précédent. La figure(4) illustre la distribution de la température latéralement et en profondeur à travers toute la surface pour une valeur de puissance incidente de $500\text{w}/\text{cm}^2$.

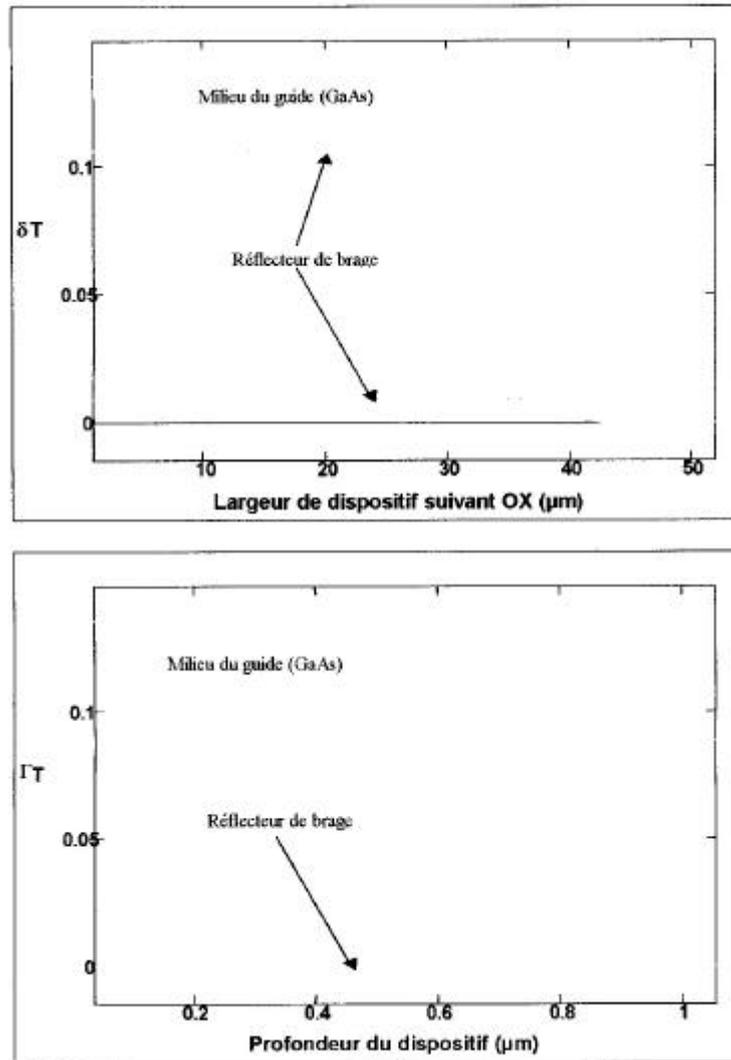


Figure 4 : Evolution de la température dans la structure éclairée sur la demi surface

Ces résultats montrent que, bien que la densité de puissance de chauffage soit uniforme, la variation de la température dans la structure est non uniforme, en raison de la diffusion de la chaleur mais elle baisse très vite, quand on s'éloigne de la zone chauffée.

On notera que pour un éclairage sur la demi surface la chaleur diffuse également plus en profondeur que latéralement, quand on s'éloigne de la zone chauffée la diffusion de la chaleur est de moins en moins importante.

L'évolution de la température en fonction de la densité de puissance incidente au niveau du guide est donnée par la (figure 5).

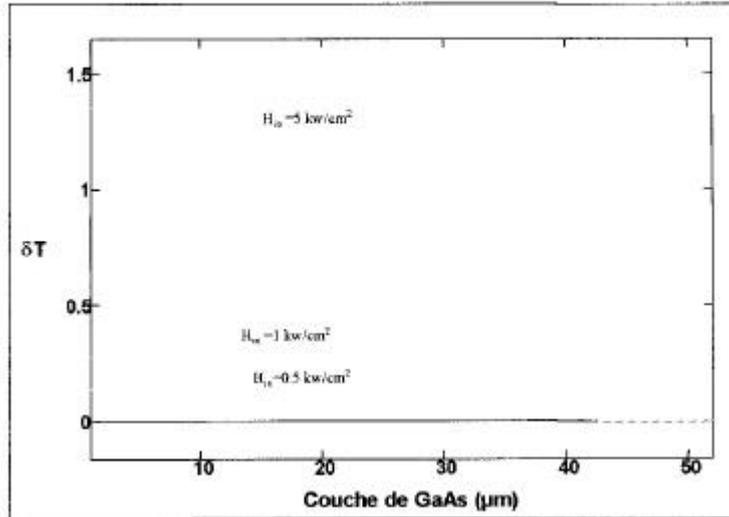


Figure 5 : Evolution de la température en fonction de la densité de puissance

Quand la densité de puissance augmente (0.5, 1, et 5 kw/cm^2), la variation de T_{max} augmente linéairement (0.13, 0.27, et 1.35)K.

4- EVACUATION DE LA CHALEUR

En régime dynamique, le dispositif est éclairé à l'aide d'impulsions lumineuses. Afin de prévoir la période de récurrence des impulsions, nous procédons à la simulation de l'évolution de la température en fonction du temps à partir de l'équation de diffusion de la chaleur (équation 1), la période minimale de récurrence de l'impulsion étant liée au temps de décroissance de la température.

Dans un premier temps, on vérifie la convergence de la température vers sa valeur d'équilibre et on évalue le temps d'évacuation de la chaleur en fonction de temps. Par exemple pour $H_n = 400 \text{W/cm}^2$, nous constatons sur la figure 6, une première décroissance rapide d'environ 13 ns de durée, où la température chute au demi de sa valeur maximale. Cette décroissance est liée à la dissipation de la chaleur par la couche mince du guide GaAs. La seconde décroissance plus lente est évaluée à 1 ms, est relevée pour la valeur du dixième du maximum de la température. Cette dernière est attribuée à l'évacuation moins rapide par le miroir de Bragg. Ces résultats fixent la période de récurrence à utiliser en régime impulsif à environ 1 ms.

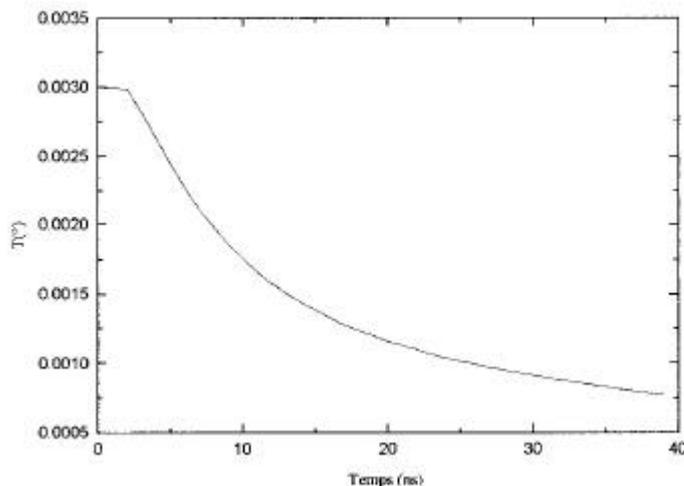


Figure 6 : Décroissance temporelle de la température

5- CONCLUSION

Ces résultats de simulation ont permis l'étude de la répartition de la température dans le commutateur optoélectronique et de mettre en évidence la faible influence des effets thermiques en régime statique. Le programme établi est utilisé dans l'étude en régime dynamique pour le calcul de la variation de la température à chaque instant t (pas sur le temps), ce qui permet après suppression de la source d'éclairage d'établir l'évolution de la température pour des temps assez longs, et d'évaluer le temps d'évacuation de la chaleur par le commutateur.

En régime de commutation (régime dynamique) la minimisation des effets thermiques est nécessaire. Elle dépend du choix de la densité de puissance incidente mais également de la durée de l'impulsion lumineuse. Elle doit être inférieure à la durée de vie des porteurs afin d'empêcher un développement trop rapide des effets thermiques. Aussi nous veillerons à éclairer le dispositif avec une densité de puissance modérée.

6- BIBLIOGRAPHIE

- [1] R . BENSALÉM " *Rapid thermal annealing of donor implants in gallium arsenide* ", Thèse PHD microelectronique university of surrey, [1986].
- [2] FLORENT BERTRAND " *Etude expérimentale et modélisation de structures guide d'ondes en semi-conducteur 111-V pour la commutation optique* ", Thèse de doctorat d'université ORSAY (1997).
- [3] T. BOUCHEMAT " *Etude et caractérisation optique de couche de SIMOX en vue d'application à des dispositifs optoélectroniques* ".Thèse de doctorat d'état, université de Constantine (1999).
- [4] K Koynovl, N Paraire, F Bertrand, R El Bermil and P Dansas " *Design and investigation of semiconductor waveguide structures with grating couplers used as all-optical switches* " Institute of physics publishing journal of optics [2001].
- [5] Z.Al-Kinani, M.Bouchemat, T.Bouchemat, F.Hobar, A.Koster et S.Laval, D.Pascal " *Étude d'une photodiode à base d'un guide d'onde Silicium sur SIMOX pour la réalisation d'un commutateur optoélectronique*" Revue sciences et technologie de l'université Mentouri de Constantine N°17, Juin 2002, PP.49-54.
- [6] A.Kastler " *Thermodynamique* ". Edition Masson (1991).
- [7] P.Le Tallec. " *Numerical methods for non linear three-dimensional elasticity* ". Hand-book of numerical analysis, vol. 1994. PP 465-622.
- [8] M.Sibony at G.Cl.Mardon " *Analyse numérique II: approximation et équations différentielles* ", édition Herkamm (1982).
- [9] Z.Al-Kinani, M.Bouchemat, T.Bouchemat, F.Hobar, S.Laval, A.Koster ." *Modélisation des effets non linéaires dans une photodiode à base d'un guide d'onde sur SIMOX* " CEMMC- Tlemcen (Algérie) (2001).
- [10] J.P.Nougier. (1969) " *Méthodes de calcul numériques* ". Edition Masson.