

MODELISATION NUMERIQUE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS D'UN PHOTONDUCTEUR A CAVITE SUBMICRONIQUE

RECHEM DJAMIL⁽¹⁾, A. AIT KAKI⁽¹⁾, MS. BEN LATRECHE⁽¹⁾,
M. BOUCHEMAT⁽¹⁾, S. LAVAL⁽²⁾

⁽¹⁾Département d'Electronique, faculté des sciences de l'ingénieur- université Mentouri Constantine, Algérie.

Tél. : (031) 61 42 07- fax : (031) 61 42 06

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

RESUME

Ce travail présente l'étude du fonctionnement dynamique des dispositifs pour la commutation optique dans le domaine des impulsions de quelque nanosecondes. Ces dispositifs sont constitués d'un guide d'onde non linéaire en silicium sur saphir, avec coupleur à réseau de diffraction.

Le principe de fonctionnement de ce dispositif repose sur une création importante des porteurs par absorption de l'onde guidée, il doit recevoir donc le maximum de lumière, pour cela le couplage par réseau doit être efficace.

Pour cela nous avons modélisé le comportement de ce dispositif en régime dynamique (en tout optique), par la méthode des éléments finis, en tenant compte de la variation de l'indice de réfraction avec la densité des porteurs en excès, et de l'effet de l'élévation de la température résultant de recombinaisons des porteurs.

Nous avons ainsi expliqué l'existence de deux commutations (l'une d'origine électronique et l'autre d'origine thermique) sur les intensités absorbées ou transmises.

ABSTRACT

This work presents the study of the dynamic working of devices for the optic commutation in the domain of impulses of some nanoseconds. These devices are constituted of a wave guide no linear in silicon on sapphire, with coupler to system of diffraction.

The principle of workings of this device reclines on a creation important of carriers by absorption of the wave guided, it must receive the maximum of light therefore, for it the coupling by system must be efficient.

We are presented the model of this device in dynamic regime (in all optic), by the finite element method, while holding amount of the variation of the refraction indication with the density of carriers in excess, and the effect of the elevation of the temperature results recombination of carriers.

We have explains the existence of two commutations thus (one of electronic origin and the thermal origin other) on the absorbed intensities either transmitted.

1. INTRODUCTION

La commande du déclenchement d'appareils électroniques par une impulsion lumineuse devient une technique de plus en plus courante à mesure que l'emploi des lasers impulsions se généralise dans de nombreux domaines de la physique.

Même si cette technique a apporté une amélioration considérable sur l'incertitude de l'instant de déclenchement, celle-ci reste encore gênante dans de nombreuses applications. La recherche d'une meilleure précision sur cet instant nous a amené à étudier un commutateur optoélectronique dont le fonctionnement propre réduit cette incertitude, sans avoir à ajouter un élément supplémentaire qu'il soit

optique ou électronique. Ce commutateur optoélectronique allie le fonctionnement d'un commutateur classique à celui d'un guide d'onde optique, non-linéaire plan capable de produire des commutations rapides.

Le type de dispositif étudié est une structure originale [1] à cavité submicronique, constituée d'un guide d'onde optique plan en silicium qui est un matériau non linéaire pour les ondes lumineuses dans le proche infra-rouge épitaxié sur un substrat transparent de saphir, le couplage de la lumière incidente dans la couche de silicium étant assuré par un réseau de diffraction gravé à sa surface.

Les paramètres régissant le fonctionnement du photo détecteur sont le décalage angulaire par rapport à la

résonance et la densité de puissance incidente. En effet, le film guidant de silicium est légèrement absorbant à la longueur d'onde $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ et présente des non-linéarités d'origine électronique et thermique dues à la variation d'indice. Ces effets peuvent être observés sur les intensités transmises et absorbées par le guide.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF

Le silicium présente de forte non-linéarité optique il est donc envisageable de l'utiliser comme matériau actif d'un guide d'onde optique plan non linéaire, qui peut être hétéroépitaxié en couche mince sur un substrat transparent de saphir assurant la rigidité mécanique de l'ensemble (Figure 1).

L'introduction de lumière dans le guide est réalisée à l'aide d'un coupleur à réseau adapté dans la mesure où il conserve le caractère plan du dispositif et ne nécessite aucun réglage particulier, c'est une configuration plane, stable et simple d'emploi.

Ce dispositif est essentiellement un photoconducteur de largeur $500\mu\text{m}$, d'épaisseur saphir de $325\mu\text{m}$, et d'épaisseur silicium de $0.627\mu\text{m}$.

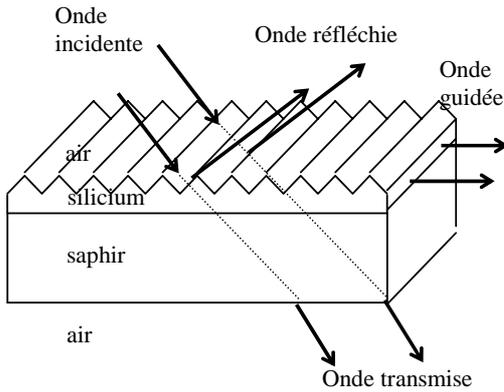


Figure 1 : Schéma du dispositif

3. MODELE NUMERIQUE PAR ELEMENTS FINIS

Dans le cas du silicium, la non-linéarité optique est principalement due à deux mécanismes différents, l'un d'origine électronique et l'autre d'origine thermique.

La variation de la partie réelle de l'indice de réfraction en présence de ce plasma d'électron trou s'écrit [1],[2]:

$$\delta n_e = K_e \delta N \quad (1)$$

Le coefficient K_e à $\lambda = 1.064\mu\text{m}$ vaut : $K_e = -9,0.10^{-22} + i 8,5.10^{-6} \sigma \text{ cm}^3$

σ : section efficace de capture d'un électron et d'un trou

comme σ est très faible $K_e \approx -9,0.10^{-22} \text{ cm}^3$.

En effet, lorsqu'une densité δN des paires électrons-trous est présentée dans la couche, tous les photons absorbés ne provoquent pas la création d'une paire électron-trou. Seule une proportion de $\eta_0 \alpha_0 / \alpha (\delta N)$ y contribue, avec $\eta_0 = 1$ et $\alpha(\delta N) = \alpha_0 + \alpha(\delta N)$ définissant le coefficient d'absorption.

Les non-linéarités d'origine thermique résultent de la contribution de trois phénomènes : la recombinaison des porteurs photo créés par l'effet Auger, la thermalisation des porteurs libres et l'effet joule dû à la polarisation du dispositif. Ce qui induit une variation d'indice d'origine thermique, notée :

$$\delta n_{th} = K_{th} \cdot \delta T(t) \quad (2)$$

à $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$. On trouve [3] :

$$K_{th} \approx 2,8.10^{-4} + i 9,3 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$$

On peut étudier la compétition des deux phénomènes de variation d'indice de réfraction en considérant la variation globale de l'indice de réfraction comme étant la somme des variations due aux deux effets [4] : $\delta n = \delta n_e + \delta n_{th}$

La simulation du fonctionnement dynamique des dispositifs à guides d'ondes en silicium sur saphir pour la commutation optique permet d'étudier l'évolution des différentes grandeurs (la variation de la température δT , la variation du nombre de porteurs δN , la variation d'indice δn , l'absorptance A et la transmittance τ), de déduire la puissance seuil pouvant induire les effets non linéaires ainsi que le décalage angulaire optimum permettant d'observer une commutation bien contrastée.

Nous remarquons que les paramètres δn , A , et τ dépendent des variations de la température et du nombre de porteurs.

$$\delta n = K_e \cdot \delta N + K_{th} \cdot \delta T(t)$$

$$A = \frac{\delta n}{p_a}$$

p_a : puissance surfacique absorbée pour la transmittance τ , elle est extraite à partir des courbes expérimentales.

On sait que l'indice de réfraction du silicium dépend de la température. Il nous faut donc déterminer l'évolution de celle-ci, qui est régie par l'équation générale de la conduction.

On applique le premier principe de la thermodynamique [5], [6], à un volume fini (V), On a donc en chaque point de (V) :

$$\Delta T(\vec{r}, t) - \alpha \frac{\partial T}{\partial t}(\vec{r}, t) + \frac{1}{K} \frac{dK}{dT} (\text{grad} T(\vec{r}, t))^2 + \frac{S(\vec{r}, t)}{K} = 0 \quad (3)$$

$S(\vec{r}, t)$ définit la puissance thermique (quantité de chaleur) qu'elle produit par unité de volume.

$$\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_v}$$

K , ρ , C_v sont respectivement la conductivité thermique, la densité volumique et la capacité calorifique volumique.

L'évolution de la densité de porteurs libres s'écrit [1] :

$$\frac{d\delta N(t)}{dt} = G(t) - U[\delta N(t)] \quad (4)$$

G : taux de génération

R : taux de recombinaison

Cette équation comporte des termes linéaires et non linéaires. Elle se résout par la méthode de Newton [7].

La méthode des éléments finis consiste à utiliser une approximation simple de l'inconnue recherchée pour transformer les équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques. Cependant, elle ne s'applique pas directement aux dérivées partielles mais, à une intégrale qui est équivalente au problème à résoudre.

1.1 Discrétisation

Pour trouver la distribution de la grandeur inconnue du problème traité, on divise la région en éléments finis. Cette discrétisation, peut être constituée d'un type unique d'éléments ou d'un couplage de plusieurs types. Dans la majorité des cas, on préfère utiliser des éléments exclusivement triangulaires du premier ordre, parce qu'il ont l'avantage de s'adapter mieux aux géométries complexes et permettent une numération systématique des points.

1.2 Formulation intégral

La méthode des résidus pondérés consiste, à subdiviser le domaine étudié en éléments simple, appelées éléments finis et à approximer l'inconnu T de l'équation (3) sur chaque éléments par des fonction d'interpolation et en déterminant les fonction poids Ψ_i telle que :

$$\int_{\Omega} \Psi_i \cdot R \cdot d\Omega = 0 \quad (5)$$

R étant le résidu

1.3 Forme matricielle

Il s'agit de mettre sous forme matricielle, les formes intégrales de l'équation à résoudre, dans chaque domaine élémentaire \mathcal{Q} .

Nous obtenons, un système d'équation algébrique de la forme : $[C]\{T\} = \{F\}$

$[C]$: matrice de rigidité globale

$\{F\}$: vecteur source

Nous avons utilisé PDETOOL de Matlab [8], [9] qui est une boîte à outils, orientée vers la résolution des problèmes au dérivées partielles.

Le traitement d'un problème consiste en l'exécution de plusieurs étapes. Notons la définition de la géométrie le maillage, l'assemblage et finalement la résolution proprement dite.

4. RESULTATS

Pour obtenir une commutation en régime dynamique pour différentes intensités incidentes et divers décalages angulaires, le dispositif est éclairé en régime impulsionnel, avec une impulsion de forme gaussienne de 60 ns de durée.

Considérons une densité de puissance incidente de crête faible, soit ($I_c=100\text{KW}/\text{cm}^2$) pour un décalage initial $\delta\theta = -0.1$ degré par rapport à la résonance (avoir le maximum de puissance lumineuse absorbée dans le guide), d'où nous calculons les différentes intensités diffractées. Nous constatons que l'intensité transmise I_t est *homothétique* de l'intensité incidente I_i (figure 2). La variation d'indice δn (figure 3) résultant de la contribution des deux effets électronique δn_e et thermique δn_{th} n'est pas suffisante pour induire un décalage angulaire suffisamment élevé qui compense le décalage angulaire imposé initialement ($\delta\theta$ est l'angle entre l'onde incident et l'axe verticale, qui est compensé par les effets non-linéaire dans le guide), permettant le passage par la résonance.

On augmente la puissance incidente ($I_c=1\text{MW}/\text{cm}^2$) et on conserve le même décalage angulaire. La (figure 4) met en évidence la prépondérance des effets électroniques au début de l'impulsion.

La variation globale de l'indice du silicium est donc initialement négative, ce qui conduit à raccorder le dispositif, puisque la variation d'indice nécessaire pour atteindre la résonance est négative (pour $\delta\theta < 0$).

L'augmentation résultante de l'absorptance se produit toujours pendant la phase de croissance de l'impulsion incidente. Elle induit une augmentation très rapide de la puissance absorbée dans le silicium ; ce qui, par conséquent, accélère la croissance du nombre de porteurs libres et par un quasi-empilement du processus, provoque cette première commutation (Augmentation pour l'absorptance, diminution pour la transmittance), dont l'origine est donc presque exclusivement électronique. Lorsque la variation globale d'indice $\delta n(t)$ a dépassé la valeur d'indice de résonance, il y a stabilisation de la valeur de l'indice globale. Cette stabilisation dure 10ns.

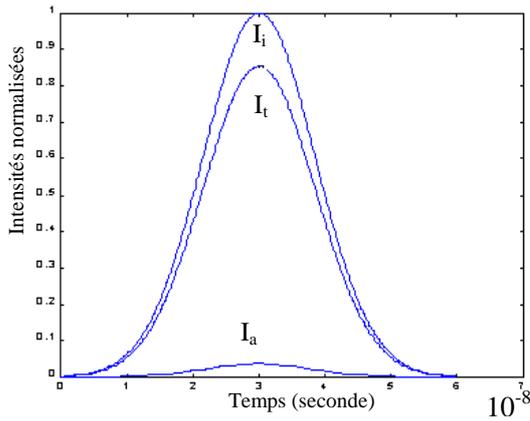


Figure 2 : Variation temporelle des intensités incidente, transmise et absorbée.

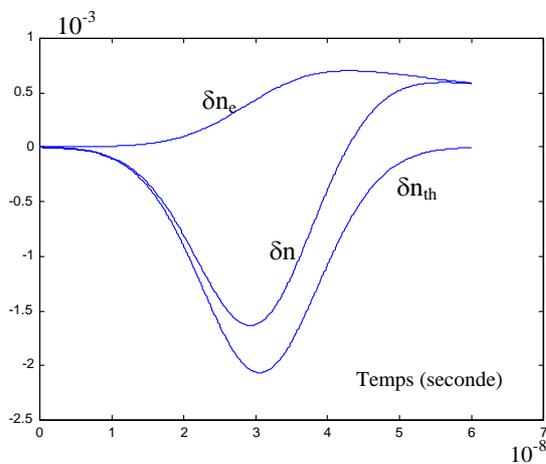


Figure 3 : Contribution à la variation de l'indice

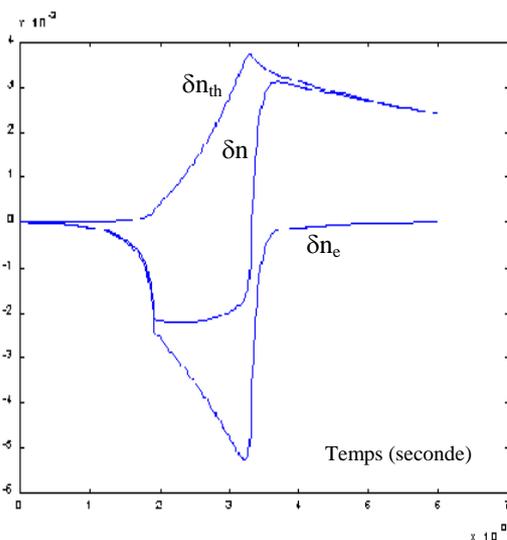


Figure 4 : Contributions à la variation de l'indice

L'évolution de la variation globale d'indice $\delta n_{si}(t) = \delta n_e + \delta n_{th}$, est figée alors que les variations électronique et thermique d'indice évoluent considérablement mais de manière *antagoniste* et se compensent quasi-parfaitement (figure 4). On quitte

cette situation lorsque les effets thermiques se renforcent par rapport aux effets électroniques. La seconde commutation qui suit (diminution pour l'absorbance augmentation pour la transmittance) est due à la prépondérance des effets thermiques sur les effets électroniques, (figure 5).

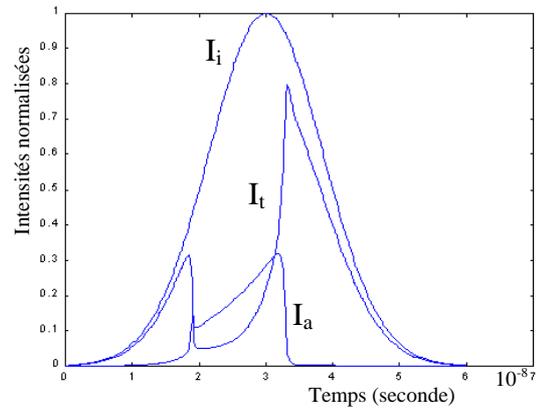


Figure 5 : Variation des intensités incidente transmise et absorbée

La variation du décalage angulaire résultant est proportionnelle à la variation totale de l'indice de réfraction, on remarque aussi les deux commutations (figure 6).

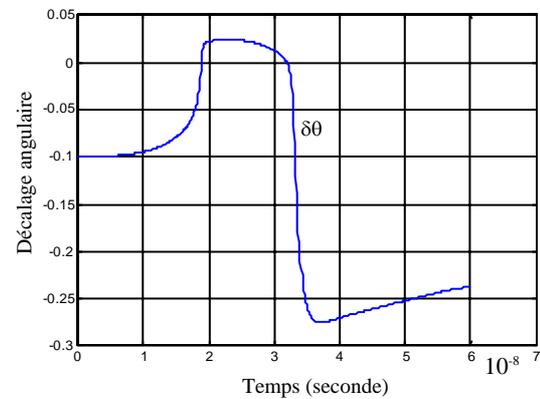


Figure 6 : Variation du décalage angulaire

5. COMPARAISON AVEC LES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les résultats expérimentaux ont été réalisés, à l'institut d'électronique fondamentale de l'université paris XI, en éclairant le dispositif à l'aide d'un laser ND-YAG ($\lambda = 1.064\mu\text{m}$), fonctionnant en régime impulsif.

La figure 7-a située en vis-à-vis de la figure 7-b pour comparaison présente la simulation du fonctionnement dynamique du dispositif silicium sur saphir et montre qu'il a des accords satisfaisants entre les simulations et les observations expérimentales.

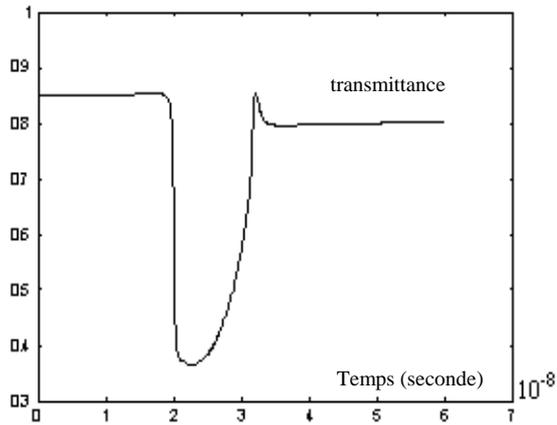


Figure 7a : Simulation du fonctionnement dynamique du dispositif

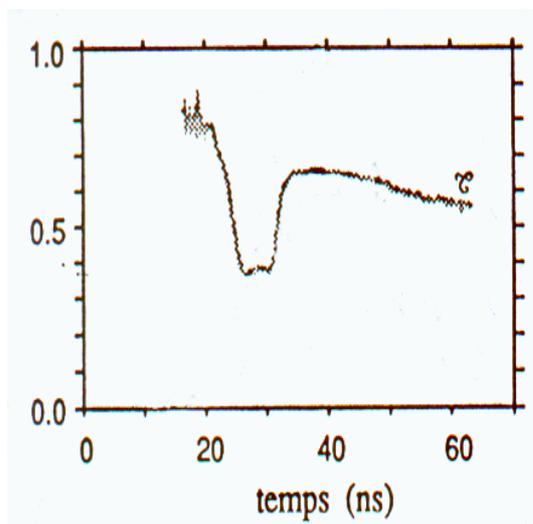


Figure 7b : Résultat expérimental ($I_c=1\text{MW/cm}^2$; $\delta\theta=0.1^\circ$)

6. CONCLUSION

Le but de ce travail était d'étudier un dispositif silicium sur saphir permettant d'obtenir des commutations ultra rapides, en souhaitant améliorer la compréhension théorique du fonctionnement dynamique, dans le domaine des impulsions nanoseconde.

Après avoir montré que les non linéarités du silicium ont principalement deux origines, l'une thermique, l'autre électronique, produisant des variations des propriétés optiques d'ordre de grandeur comparables mais de sens opposées, nous avons mis en évidence

le rôle fondamental, de la compétition entre ces deux effets dans le fonctionnement dynamique des dispositifs.

Pour cela, nous avons développé une modélisation complète du fonctionnement dynamique des dispositifs, par la méthode des éléments finis prenant simultanément en compte les effets électronique et thermique.

Les résultats de simulation en régime non linéaire mettent en évidence l'existence de deux commutations l'une d'origine électronique et la seconde d'origine thermique qui est due à la recombinaison des porteurs.

Nous avons ensuite déterminé le domaine de fonctionnement du commutateur, en ce qui concerne les densités de puissance ainsi les décalages angulaires par rapport à la résonance, pour obtenir des commutations les plus rapides et les plus contrastées possible sur l'intensité transmise.

Enfin, nous avons comparé les résultats expérimentaux (intensités transmises) avec ceux de la simulation, nous avons conclu un bon accord.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] F. PARDO, «Etude et réalisation d'un dispositif bistable optique basé sur l'excitation d'un mode guidé couplé par réseau dans une couche mince de silicium sur saphir», Thèse, université de Paris-Sud, (1986)
- [2] C. KITTEL, «Introduction à la physique de l'état solide», DUNOD (1972).
- [3] D. A. S. MILLER, S. D. SMITH «Optical bistability in semiconducteurs», IEEE journal of quantum electronics, n°3 mars 1981.
- [4] H. SAUER «Etude théorique du fonctionnement dynamique des dispositifs à guide d'onde non linéaire pour la commutation optique», Thèse, université de Paris XI Orsay (1990).
- [5] Jean - François Sacadura «Initiation aux transferts thermiques».
- [6] J. P. HOHMAN, «Heat Trasfer», 5ed, mc graw-hill international, 1984
- [7] M. SIBONY ET G. CL. MARDON, «Analyse numérique II: Approximation et équation différentielles» Edition herkamm (1982)
- [8] Jean-Pierre Nougier, «Méthodes de calcul numérique», Édition Masson, (1991).
- [9] «partial differential equation, TOOLBOX for use with Matlab».