

ETUDE D'UNE PHOTODIODE A BASE D'UN GUIDE D'ONDE SILICIUM SUR SIMOX POUR LA REALISATION D'UN COMMUTATEUR OPTOELECTRONIQUE

Reçu le 21/01/2001 – Accepté le 21/04/2002

Résumé

Cette étude concerne la modélisation du fonctionnement non linéaire du composant photodiode en régime dynamique, le but étant la réalisation de commutateurs optoélectroniques à seuil rapide. La structure de base de ces composants consiste en un guide d'onde silicium sur isolant de type SIMOX, avec coupleur à réseau de diffraction.

Les non linéarités optiques dans le silicium sont liées à la variation de l'indice de réfraction, et sont exploitées pour obtenir des commutations rapides sur le photocourant lié à la propagation du mode fondamental dans le guide. Les performances de la photodiode sont fortement dépendantes de son temps de montée et de sa sensibilité. On veillera à optimiser ces deux derniers.

Le modèle de fonctionnement non linéaire de la photodiode, établi en régime dynamique, est basé sur les variations de l'indice de réfraction, occasionnées à la fois par la création de porteurs libres et par les effets thermiques dus à la recombinaison des porteurs et à l'effet Joule. Ce modèle permet, à partir de l'évolution temporelle du photocourant, de déterminer le domaine de fonctionnement du photodétecteur en ajustant les paramètres clés tel que la densité de puissance incidente, le décalage angulaire par rapport à la résonance ainsi que la tension de polarisation.

Mots clés: SIMOX, guide d'ondes, non linéarités optiques, photodiode, commutation.

Abstract

This study concerns the modeling of a photodiode non-linear operation in the dynamic regime. The aim of this work is to carry out a fast photodetector with power threshold. The basic structure of these components consist in a wave-guide in silicon on insulator of SIMOX type a diffraction grating coupler. The optical non-linearities in silicon are due to the variation of the refractive index and are used to get some fast switching on the photocurrent associated to the propagation of the fundamental mode in the guide.

Performances of the photodiode are strongly dependent on of its use time and its sensitivity one will try to optimize these two elements. The non-linear operation model, established in the dynamic regime is based on variation of the refractive index due simultaneously to a time by the creation of free carries and to the thermal effects associated to the recombination of carries and the effect Joule.

This model allows from the temporal evolution of the photocurrent to determine the operation domain of the photo detector while adjusting the key parameters as: the incident power density, the angular shift with regard to the resonance as well as the tension of polarization.

Key words: SIMOX, Wave guide, Optical non linearities, Photodiode, switching.

Z. AL-KINANI
M. BOUCHEMAT
T. BOUCHEMAT
F. HOBAR

Faculté des sciences de
l'ingénieur
Département d'électronique
Université Mentouri
Constantine, Algérie

A. KOSTER
S. LAVAL
D. PASCAL

Institut d'électronique
fondamentale
CNRS URA 22, Bât. 220
Université Paris Sud
91405 Orsay Cedex, France

ملخص

تهتم هذه الدراسة بتشغيل نموذجي، غير خطي، لثنائي قطب ضوئي وذلك في نظام ديناميكي والهدف هو تحقيق مبدل ضوئي إلكتروني ذو عتبة سريعة. تتركز البنية الأساسية لهذه المركبات على موجه موجة من السيلسيوم المصنوع على عازل من نوع " SIMOX " ، مع مزدوج بشبكة انكسار. ترتبط خواص عدم خطية الضوء في السيلسيوم بتغير قرينة الانكسار، وبالتالي يمكن استغلالها في الحصول على مبدلات سريعة لانتشار التيار الضوئي المرتبط أساسا بشكل الموجه للموجة. إن فعالية ثنائي القطب الضوئي ترتبط أكثر بزمن الصعود والحساسية، لذا نعمل على تحسينهما.

نموذج التشغيل غير الخطي لثنائي قطب ضوئي والمقام في نظام ديناميكي يعتمد على تغيرات كل من قرينة الانكسار، المسببة في نفس الوقت باستحداث حاملات حرة وتأثيرات حرارية ناتجة عن إعادة اتحاد الحاملات وعلى مفعول جول.

يسمح هذا النموذج، ابتداء من التطور المؤقت للتيار الضوئي، بتحديد مجال تشغيل الكاشف الضوئي وذلك بالتحكم في مفاتيح العوامل مثل: كثافة الإشعاع المسلط (الوارد)، الانحراف الزاوي بالنسبة للتجاوب وكذلك جهد الاستقطاب.

الكلمات المفتاحية: SIMOX ، موجه الموجة، عدم الخطية الضوئية، ثنائي القطب الضوئي، مبدل.

Dans le domaine de l'instrumentation, certaines expériences requièrent l'utilisation de laser de puissance. Les appareils électriques constituant la chaîne laser doivent être parfaitement synchronisés. Pour cela, on introduit dans le système de détection un photodétecteur à seuil de puissance rapide. Ce dernier est un photoconducteur [1,2] où une photodiode [3] dont la structure de base est un guide d'onde optique non linéaire, qui génère, dès que l'intensité lumineuse délivrée par le laser atteint un certain seuil, un signal électrique suffisant quant à la synchronisation des différents appareils électriques.

Pour l'application au laser Nd-Yag à la longueur d'onde $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, le silicium sur isolant a longtemps été utilisé pour réaliser des guides d'onde non linéaires [4].

Des premières études avaient été menées sur les commutateurs optoélectroniques à seuil à guide d'onde silicium sur saphir [4-6]. Les effets non linéaires ont été observés sur ces guides d'ondes, mais la recombinaison des porteurs photocréés de durée de vie inférieure à la nanoseconde, entraîne un développement rapide des effets thermiques qui altèrent les qualités du commutateur dans le domaine des impulsions de quelques nanosecondes [7].

Les substrats SOI de type SIMOX (Séparation par Implantation d'Oxygène) de meilleure qualité cristallographique sont de plus en plus utilisés.

Ainsi, différentes études ont été menées sur des guides d'ondes sur SIMOX en vue d'applications diverses, tel que la réalisation de modulateurs spatiaux de lumière [8], de commutateurs optiques [9], et

de photodétecteurs à seuil de puissance (photoconducteurs [1] ou photodiodes [3]). Les photoconducteurs qui ont été étudiés en premier ont l'inconvénient de présenter un courant d'obscurité élevé et un temps de réponse relativement lent qui dépend de la durée de vie des porteurs ($1\mu\text{s}$) [1].

Dans le composant photodiode que nous allons étudier à présent, contrairement au photoconducteur, il y a possibilité de réduction du courant d'obscurité et amélioration de la rapidité de réponse qui ne va plus dépendre de la durée de vie des porteurs, mais de leur temps de transit.

Le matériau SIMOX est intéressant pour l'optique intégrée dans la mesure où l'indice de réfraction de la couche de silice enterrée, beaucoup plus faible que celui du silicium, permet un excellent confinement de la lumière dans la couche superficielle de silicium utilisée comme guide d'onde. De plus, l'amélioration de la qualité de l'interface silicium / SiO_2 enterrée augmente la durée de vie des porteurs et réduit les pertes optiques.

Le couplage de la lumière dans le guide d'onde est effectué à l'aide d'un réseau de diffraction. Une simulation entreprise en régime linéaire permet d'optimiser ce couplage afin d'obtenir des résonances aiguës sur les intensités absorbées et transmises [8].

L'objectif de notre simulation est l'étude de l'évolution temporelle des intensités réfléchies, absorbées et transmises ainsi que le photocourant. Ceci permet d'optimiser les paramètres du dispositif photodiode, pour obtenir des commutations rapides et contrastées, en utilisant les propriétés optiques non linéaires du silicium. Ces dernières sont liées à la variation de l'indice de réfraction du guide, en fonction du nombre de porteurs photocréés (effets électroniques) et de la variation de la température (effets thermiques).

PRESENTATION DU DISPOSITIF

La figure 1 représente la structure élémentaire des dispositifs à guide d'onde optique sur SIMOX, avec les différents faisceaux lumineux : Le faisceau incident I_i formant un angle θ_i avec la normale au guide, et le faisceau transmis I_t . Le composant de base est un guide d'onde sur SIMOX, formé par un empilement de couches diélectriques (Fig. 1) dont une couche mince de silicium formant le film guidant de $0,1\mu\text{m}$ et une couche enterrée de SiO_2 de $0,45\mu\text{m}$ d'épaisseur. La couche enterrée de SiO_2 possède un indice de réfraction beaucoup plus faible que celui du silicium, il en résulte un excellent confinement de la lumière dans le film de silicium utilisé comme guide d'onde monomode. Le composant photodiode est réalisé par implantation de zones N^+ et P^+ dans la couche de silicium de part et d'autre du guide.

La lumière est couplée dans le guide par un réseau de diffraction, et pour un angle θ_i donné, nous pouvons exciter le mode du guide de manière résonante.

A la longueur d'onde $\lambda = 1,06\mu\text{m}$ le silicium est légèrement absorbant, les paires électron-trou sont générées dans la structure et le photocourant s'établit entre les deux électrodes. Les distances entre les régions dopées et entre les électrodes sont respectivement de 14 et 24 μm . La

largeur des électrodes est de $500\mu\text{m}$. Quand on éclaire la structure photoconducteur [1], on applique une tension positive entre les électrodes, il en résultait un photocourant s'exprimant en fonction de la durée de vie des porteurs [10]. Par contre la photodiode est polarisée en inverse, les porteurs photocréés sont séparés par le champ électrique intense régnant dans la zone de charge d'espace et rejoignent les contacts. Les porteurs atteignent le contact au bout d'un temps t_t (temps de transit) et sont réinjectés par l'autre contact.

La création de porteurs dans le silicium induit des effets électroniques qui contribuent à diminuer l'indice de réfraction, contrairement à l'évolution des effets thermiques qui agissent de manière antagoniste. Il est donc impératif de limiter l'échauffement dû aux effets thermiques résultant entre autres de l'effet Joule dû à l'établissement du photocourant. Ainsi, on pourra favoriser la commutation d'origine électronique.

Les effets non linéaires dans le silicium induisent une variation de l'indice de réfraction et modifient la constante de propagation du mode guidé. Si θ_r est l'angle de résonance en régime linéaire (variation d'indice négligeable), au temps $t = 0$, on se place hors résonance en optant pour un angle d'incidence $\theta_i = \theta_r + \delta\theta_0$, tel que $\delta\theta_0 < 0$. Ainsi, au fur et à mesure que les effets non linéaires s'instaurent et que l'indice de réfraction diminue, le guide se réaccorde produisant une commutation qui se traduit par une variation brutale du photocourant pour un photodétecteur à seuil.

Dans ce modèle, le guide d'onde est supposé infini, et l'éclairement uniforme dans l'espace interélectrodes. Nous étudions les phénomènes non linéaires dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation dans le guide (plan xOy sur la figure 1).

Ce modèle est développé en géométrie bidimensionnelle afin de calculer les variations temporelles de l'indice de réfraction dans le film guidant et leur influence sur le mode résonant.

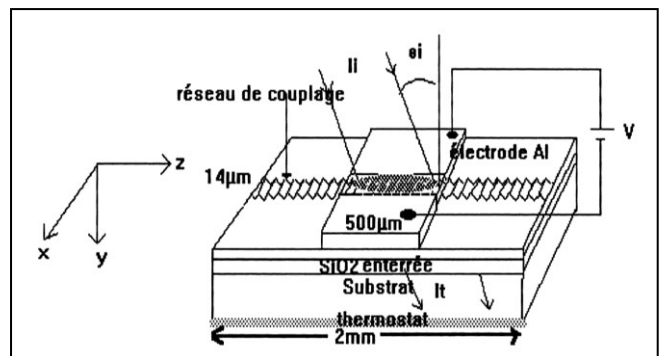


Figure 1: Structure élémentaire des composants.

MODELISATION EN REGIME NON- LINEAIRE

Les non-linéarités optiques d'origine électronique résultent de la photocréation d'un plasma de paires électron-trou de densité $\delta N(t)$. Ceci se traduit par une variation d'indice d'origine électronique [2] :

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

la constante K_e est un nombre complexe ; sa valeur, à la longueur d'onde $\lambda=1.064\mu\text{m}$ est égale à :

$$K_e = (-9.10^{-22}+i4.10^{-23}) \text{ cm}^{-3}.$$

Les non-linéarités d'origine thermique dans la photodiode résultent de la contribution de trois phénomènes : la recombinaison Auger des porteurs photocréés, la thermalisation des porteurs libres et l'effet Joule dû à la polarisation du dispositif. La recombinaison des porteurs via un centre $(\delta N/\tau)$ quant à elle est négligée, puisque le fonctionnement de la photodiode n'est plus régi par la durée de vie des porteurs τ mais par leur temps de transit. Il en résulte une variation d'indice d'origine thermique, notée [2] :

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

La valeur de K_{th} est donnée :

$$K_{th} = (2.8.10^{-4}+i9.3.10^{-7})K^{-1}$$

L'effet combiné des deux variations d'indice d'origine électronique et thermique induit une variation totale d'indice égale à :

$$\delta n_t = \delta n_e + \delta n_{th} \quad (3)$$

Cette dernière entraîne une variation de l'indice effectif du mode guidé et donc un décalage $\delta\theta$ de l'angle de résonance θ_r , correspondant à l'excitation résonnante du mode fondamental TE_0 . Ce décalage est proportionnel à la variation d'indice $\delta\theta=K\delta n_t$ où K est une constante de proportionnalité. Il est évident que le sens de déplacement de l'angle de résonance est associé à la prédominance de l'un des deux effets non-linéaires.

La simulation du fonctionnement dynamique de la photodiode 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 \mathcal{T} ainsi que le photocourant I_{ph}), 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 \mathcal{T} et du photocourant I_{ph} dépendent des variations de la température et du nombre de porteurs.

L'évolution de $\delta T(t)$ résulte de la résolution de l'équation classique de la diffusion de la chaleur :

$$\frac{\partial \delta T(\vec{r}, t)}{\partial t} - \Delta \delta T(\vec{r}, t) = \frac{S(\vec{r}, t)}{C} \quad (4)$$

où \vec{r} est le vecteur position, C la capacité calorifique, et S représente la source de chaleur volumique dissipée à la position \vec{r} . Dans notre cas, aussi bien en régime stationnaire qu'en régime dynamique, la méthode de résolution la mieux adaptée à ce système multicouches est celle des différences finies. En effet, l'équation de la chaleur et les conditions aux différentes interfaces aboutissent à un système d'équations assez complexes. Rappelons également que le substrat est thermostaté à l'ambiante pour l'évacuation de la chaleur, conformément à l'expérience.

Le mécanisme de production de la chaleur résulte de la contribution de divers processus, qui sont :

- La recombinaison des porteurs photocréés par effet Auger. La source de chaleur qui en résulte est :

$$S_r = [\gamma(\delta N)^3] E_g \quad (5)$$

γ représente le coefficient de recombinaison Auger et E_g représente la largeur de la bande interdite.

- La thermalisation des porteurs libres échauffés par absorption de photon, et qui implique une source de chauffage donnée par :

$$S_{apl} = [1 - \eta(t)] \frac{A}{e_{si}} I_i(t) \cos \theta_i \quad (6)$$

$\eta(t)$ étant le rendement quantique dépendant du temps, à travers la variation du nombre de porteurs et celle de la température [10].

$I_i(t)$ est l'intensité lumineuse incidente.

- L'échauffement par effet Joule résultant de l'application d'une tension électrique, induit une source dont l'expression s'écrit :

$$S_j = \frac{P_j}{V} = \frac{r \cdot I^2}{V} \quad (7)$$

où r est la résistance de la structure et I le courant qui la traverse.

Comme les sources de chaleur dépendent du temps, la variation du nombre de porteurs est déterminée, pour chaque instant t donné, par la résolution de l'équation de continuité [6] :

$$\frac{d\delta N(t)}{dt} = G - R \quad (8)$$

(On néglige le champ électrique et la diffusion des porteurs). G est la vitesse de génération des porteurs, elle est donnée par la relation suivante [2] :

$$G = \frac{\eta(t) A(\delta N, \delta T) I_i(t) \cos \theta_i}{e_{si} h \nu} \quad (9)$$

où $h \nu$ représente l'énergie d'un photon.

Dans les simulations, deux paramètres essentiels interviennent quant à l'optimisation des commutateurs, qui sont la densité de puissance incidente et le décalage angulaire par rapport à la résonance. Pour obtenir une commutation d'origine électronique, on se place hors résonance à $t = 0$, en considérant un angle d'incidence $\theta_i = \theta_r + \delta\theta_0$, où $\delta\theta_0$ est le décalage angulaire initial. Ainsi, au fur et à mesure que les effets non linéaires apparaissent, ils modifient la valeur de l'indice de réfraction, ce qui conduit au réaccord du guide, produisant ainsi une commutation.

Le dispositif est éclairé en régime impulsionnel, avec une impulsion de forme gaussienne de 10 ns de durée à mi-hauteur (puisque le temps de transit est très faible).

En considérant un décalage angulaire $\delta\theta_0$ négatif, nous avons calculé l'évolution des intensités incidente I_i , transmise I_t , et absorbée I_a pour le décalage angulaire limite appelé " décalage angulaire critique" $\delta\theta_0 = -0.06^\circ$.

La commutation sur l'intensité transmise apparaît pour une puissance seuil $H_{in} = 400 \text{ KW/cm}^2$ comme cela est montré sur la figure 2. Nous constatons que le seuil de puissance a considérablement augmenté par rapport à celui du composant photoconducteur [2]. Nous avons précisé auparavant que le fonctionnement de la photodiode était

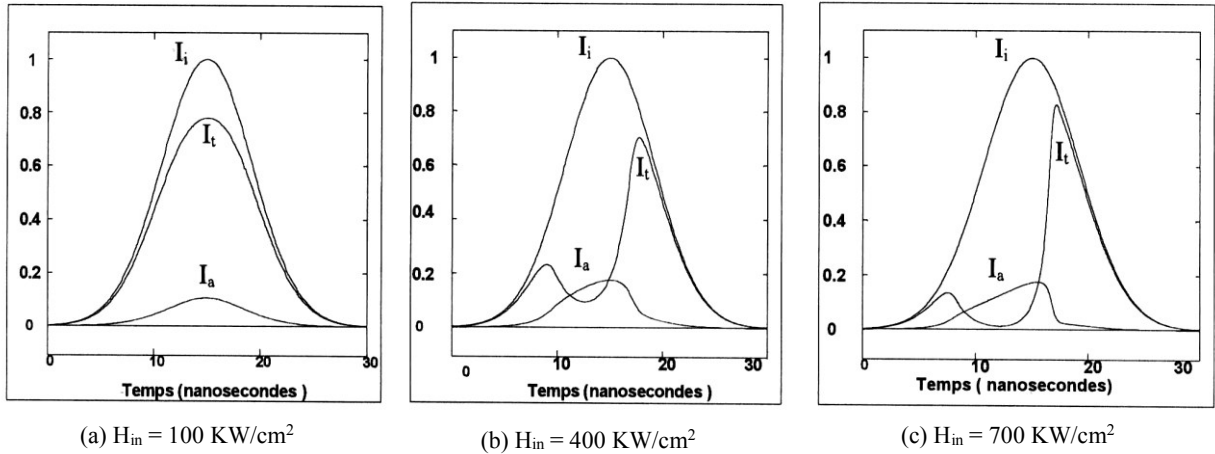


Figure 2: Simulation du fonctionnement dynamique du dispositif pour $\delta\theta = -0.06^\circ$.

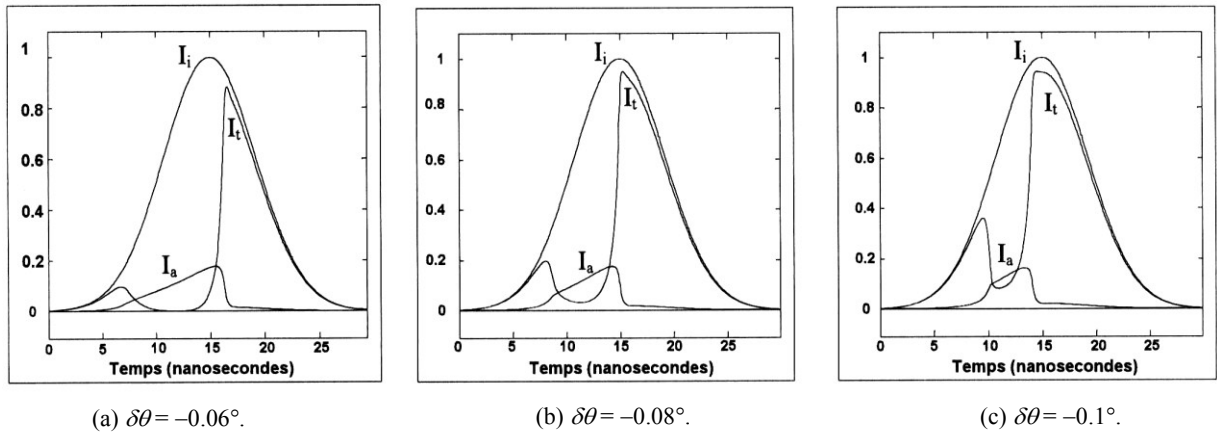


Figure 3: Simulation du fonctionnement dynamique du dispositif pour $H_{in} = 1MW/cm^2$.

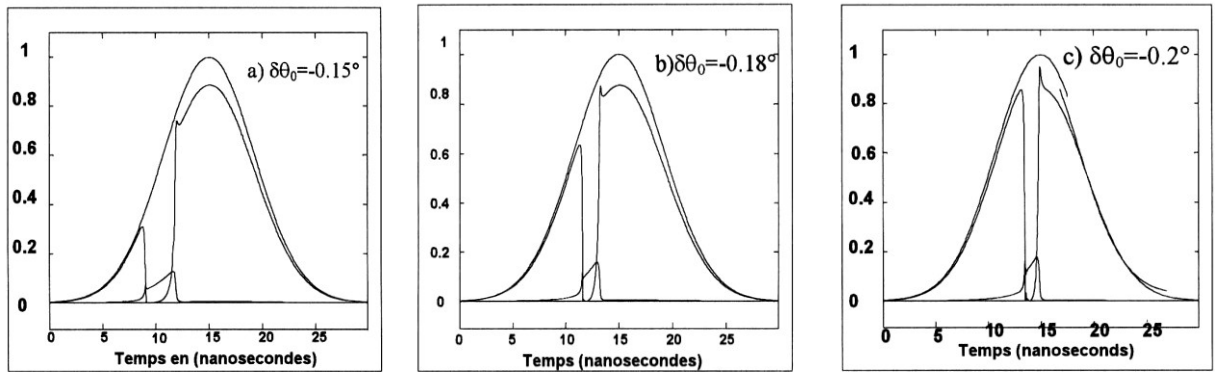


Figure 4: Simulation du fonctionnement dynamique du dispositif pour $H_{in} = 4MW/cm^2$.

régi par le temps de transit des porteurs dans la zone de charge d'espace de la diode. Ce temps de transit diminue en fonction de la tension électrique appliquée et tient lieu de durée de vie effective [3]. Il est de l'ordre de quelques nanosecondes.

On observe des non-linéarités sur l'ensemble des courbes se manifestant par deux commutations, l'une d'origine électronique et l'autre d'origine thermique. Nous constatons également que la commutation d'origine électronique avance le temps quand H_{in} augmente,

mais elle est de moins en moins rapide (Fig.2). Par contre, si on fixe la puissance lumineuse incidente, et pour des valeurs croissantes du décalage angulaire, la commutation sur l'intensité transmise est retardée mais la rapidité est améliorée (Fig.3).

Notre objectif étant d'obtenir des commutations rapides d'origine électronique. Pour cela on augmente la densité de puissance incidente à $H_{in} = 4MW/cm^2$, en prenant des décalages angulaires de plus en plus grands $\delta\theta_0 = -0.15, -0.18, \text{ et } -0.2^\circ$, pour améliorer la rapidité (Fig.4).

Les variations temporelles des indices d'origine électronique δn_e et thermique δn_{th} ainsi que la variation du décalage angulaire $\delta\theta$ obtenus pour le décalage angulaire initial optimum $\delta\theta_0 = -0.2^\circ$ sont représentés sur les figures 5 et 6.

On remarque deux commutations l'une d'origine électronique et l'autre d'origine thermique.

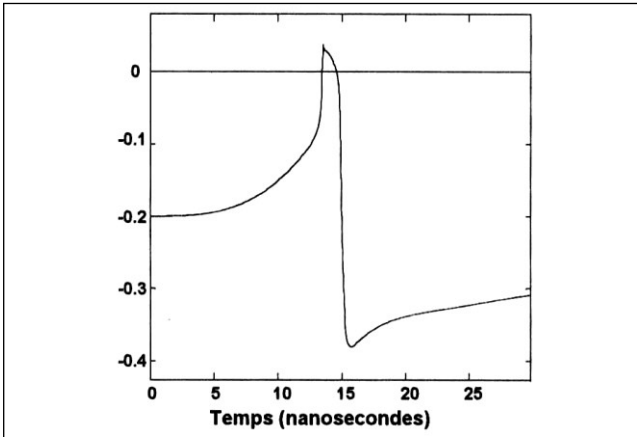


Figure 5: Variation temporelle du décalage angulaire $\delta\theta$ pour $\delta\theta_0 = -0.2^\circ$.

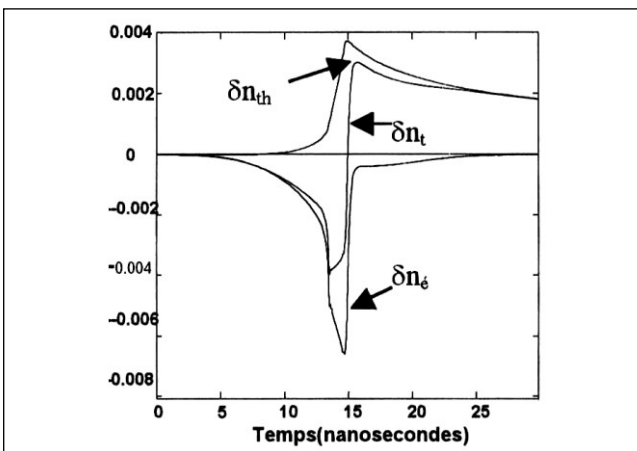


Figure 6: Variation temporelle des indices d'origine électronique et thermique pour $\delta\theta_0 = -0.2^\circ$.

EVOLUTION DU PHOTOCOURANT EN FONCTION DU DECALAGE ANGULAIRE

Cette étude a pour objectif l'optimisation de la photodiode en agissant sur les paramètres liés à ses performances (temps de montée et sensibilité).

Dans un premier temps, nous appliquons au dispositif une tension de polarisation peu élevée soit $V=1V$. Nous étudions le photocourant en fonction du décalage angulaire, pour une densité de puissance incidente crête $I_c = 5MW/cm^2$ (Fig. 7).

Sur ces courbes, on constate que la valeur maximale du photocourant augmente avec le décalage angulaire initial.

Le tableau 1 représente les valeurs des temps de montée évalués à partir des courbes donnant l'évolution temporelle du photocourant pour différents décalages angulaires. On

remarque que la rapidité de réponse de la photodiode augmente avec le décalage angulaire (le temps de montée diminue relativement en fonction du décalage angulaire).

On en conclut que la photodiode est beaucoup plus rapide que le photoconducteur à base de guide d'ondes Silicium sur isolant de type SIMOX [1]; en effet le temps de montée est réduit d'un facteur 5.

$\delta\theta_0(^\circ)$	$t_m(ns)$
-0,15°	3,70
-0,18°	3,65
-0,2°	3,62

Tableau 1: Temps de montée pour différentes valeurs du décalage angulaire initial.

On caractérise la qualité de la photodiode par son aptitude à délivrer un photocourant maximum en fonction du désaccord initial, pour une intensité lumineuse donnée.

On constate sur le tableau 2 une amélioration de la sensibilité, en fonction du décalage angulaire.

$\delta\theta_0(^\circ)$	$S(A/W/cm^2)$
-0,15°	0,1194.10 ⁻⁶
-0,18°	0,1346.10 ⁻⁶
-0,2°	0,1486.10 ⁻⁶

Tableau 2: Sensibilité pour différentes valeurs du décalage angulaire initial.

L'analyse de ces résultats permet de déterminer le décalage angulaire optimum $\delta\theta_0=-0,2$ où on améliore la sensibilité et la rapidité de la photodiode.

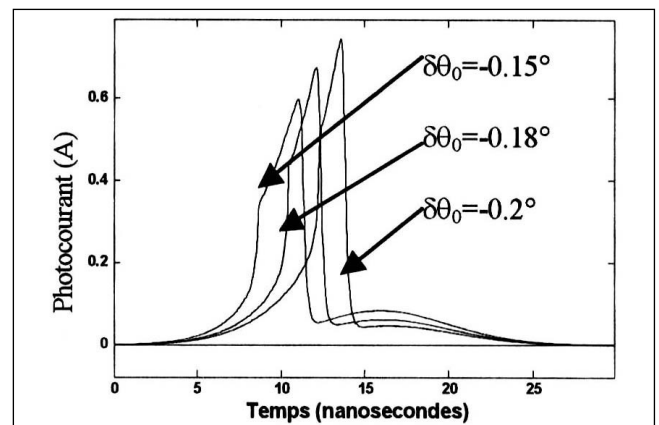


Figure 7: Evolution temporelle du photocourant pour des décalage angulaires élevés et pour une intensité crête $I_c = 5MW/cm^2$.

EVOLUTION DU PHOTOCOURANT EN FONCTION DE LA TENSION ELECTRIQUE APPLIQUEE

En fixant l'intensité crête à $I_c = 5MW/cm^2$ et le décalage à $\delta\theta_0=-0,2^\circ$, on applique au photodétecteur des tensions électriques de plus en plus élevées. Sur la figure 8, nous constatons une amélioration de la sensibilité quand nous

passons de $V=1V$ à $V=6V$, où le maximum de photocourant passe de 0,743 à 4,513A.

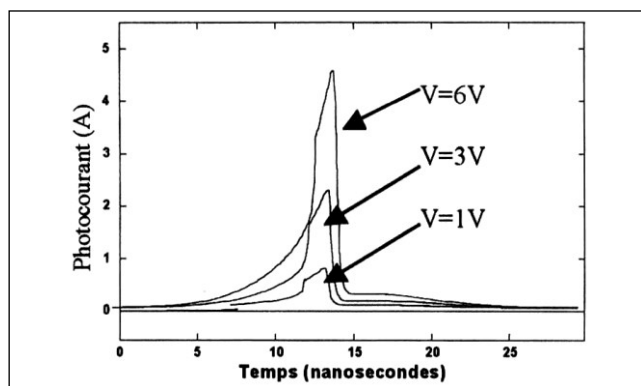


Figure 8: Evolution temporelle du photocourant pour différentes tensions électriques

Le photocourant étant proportionnel à la tension électrique appliquée, il en découle que les effets thermiques restent négligeables devant les effets électroniques pour ce domaine de tensions électriques.

CONCLUSION

Ces modélisations ont pour but l'étude du fonctionnement non linéaire d'une photodiode à base d'un guide d'onde sur isolant de type **SIMOX**. Le but est la réalisation d'un commutateur optoélectronique à seuil rapide. Nous avons déterminé le décalage angulaire critique et le seuil de puissance pour différents décalages angulaires.

Dans notre étude, on a besoin d'une puissance incidente élevée pour obtenir la première commutation d'origine électronique étant donné que le temps de transit des porteurs est relativement faible. Quand la température augmente, une deuxième commutation d'origine thermique apparaît; elle est peu prononcée et non influente sur le fonctionnement du dispositif en tant que commutateur rapide. Nous avons donc déterminé le domaine de fonctionnement du photodétecteur, en ce qui concerne les densités de puissance ainsi que le décalage angulaire par rapport à la résonance, pour obtenir les commutations le plus rapide et les plus contrastées possible sur le photocourant.

Ce composant est susceptible d'intérêt dans les applications utilisant les lasers de puissance, et les résultats

de simulation permettent une meilleure approche quant à d'éventuels tests expérimentaux.

Néanmoins, si le composant photodiode est plus rapide que le photoconducteur [11], il est évident que la puissance seuil de fonctionnement est élevée. On est confronté à un compromis rapidité/puissance seuil.

REFERENCES

- [1]- Bouchemat T., Hobar F., Koster A., Laval S., Bouchemat M. et Pascal D., "Theoretical study of non linear fast silicon photoconductive switch", *European Physical Journal Applied Physics*, Vol. 6, (1999), p.165.
- [2]- Bouchemat T., Hobar F., Bouchemat M., Koster A., Pascal D. et Laval S., "Modélisation des effets non linéaires dans un commutateur optique sur **SIMOX**", *Sciences et Technologie*, Univ. Mentouri, N°9, (1998), p. 49-54.
- [3]- Al-Kinani Z., "Modélisation des effets non linéaires dans une photodiode à base d'un guide d'onde silicium sur isolant de type **SIMOX**", thèse de magister Soutenue le 22 novembre 2000.
- [4]- Galous H., "étude et réalisation d'une matrice de portes logiques optiques à guide d'onde en silicium sur saphir", thèse de doctorat, Orsay, (1994).
- [5]- Sauer H., "Etude théorique du fonctionnement en dynamique de dispositifs guide d'onde non linéaire pour la commutation optique", thèse de doctorat, Orsay, (1990).
- [6]- Koster A., Chi W., Paraire N., Laval S., "Proceedings of the ECO3 conference", LaHaye, SPIE 1280, (1990), p. 266.
- [7]- Carton M., "Réalisation et étude d'un commutateur optoélectronique ultra rapide basé sur l'excitation d'un mode dans un guide d'onde non linéaire couplé par un réseau", thèse de doctorat, Orsay, (1988).
- [8]- Orobchouk R., "Modélisation et étude de composants pour l'optique intégrée silicium sur isolant (**SIMOX**) à $\lambda=1.3\mu\text{m}$ ", thèse de doctorat Orsay, (1996).
- [9]- Bieber A.E., Préleviez D.F. and Borin T.G., "Optimal switching in a métal-semiconductor-métal wave guide structure", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 66, N°25, (1995), pp. 3401-3403.
- [10]- Bouchemat T., "Etude et caractérisation optique de couches de **SIMOX** en vue d'application à des dispositifs optoélectroniques", thèse de doctorat d'état, université de Constantine, (avril 1999).
- [11]- Bouchemat M., Bouchemat T., Hobar F., Laval S., Koster A., "Simulation du fonctionnement de commutateurs optoélectroniques à seuil de puissance", Séminaire National sur l'Automatique et les Signaux SNAS 99, 09-10 novembre (1999), Annaba -Algérie. □