

# ANALYSE DES NON-LINEARITES OPTIQUES D'ORDRE DEUX DANS LE SILICIUM CONTRAIT

**Christian Lafforgue<sup>1</sup>, Mathias Berciano<sup>1</sup>, Guillaume Marcaud<sup>1</sup>, Xavier Le-Roux<sup>1</sup>, Carlos Alonso-Ramos<sup>1</sup>, Diego Pérez-Galacho<sup>1</sup>, Daniel Benedikovic<sup>1</sup>, Vladyslav Vakarin<sup>1</sup>, Alicia Ruiz-Caridad<sup>1</sup>, Paul Crozat<sup>1</sup>, Delphine Marris-Morini<sup>1</sup>, Eric Cassan<sup>1</sup>, Laurent Vivien<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies (C2N), Université Paris-Sud, Université Paris-Saclay, UMR CNRS 9001, 91120 Palaiseau, France*

[christian.lafforgue@c2n.upsaclay.fr](mailto:christian.lafforgue@c2n.upsaclay.fr)

## RÉSUMÉ

En déformant de façon hétérogène la maille cristalline du silicium, un effet Pockels a été démontré pour des fréquences au-delà de 20GHz. Ce travail ouvre la voie vers le développement de nouvelles générations de composants photoniques Si.

**MOTS-CLEFS :** *photonique ; silicium ; Pockels*

## 1. INTRODUCTION

La photonique silicium s'inscrit comme une future plateforme de photonique pour les communications optiques à faible consommation énergétique. Nombre de démonstrations de systèmes optoélectroniques ont déjà été développés comme les modulateurs fondés sur l'effet de dispersion de plasma, les photodétecteurs germanium, ou encore les lasers hybrides III-V intégrés sur silicium. Toutefois, l'importante évolution de la photonique silicium vers des circuits compacts à très faible consommation énergétique appelle à développer de nouvelles stratégies, en particulier pour les composants à forte consommation comme les modulateurs optiques. Cette étude a pour objectif d'exploiter l'effet Pockels dans des guides en silicium. Cependant le silicium a une structure centro-symétrique, empêchant tout effet optique non-linéaire d'ordre deux. Néanmoins, l'application sur un guide silicium d'un gradient de déformation grâce une couche contrainte, typiquement du nitrure de silicium (SiN), permet de briser sa symétrie et débloque ainsi la possibilité d'utiliser l'effet Pockels.

De nombreuses études ont été menées sur ce sujet, chacune montrant des résultats très différents. Cette diversité dans les résultats s'explique par le fait que le caractère semiconducteur du silicium n'a pas été pris en compte dans ces études. Or la distribution des charges dans les guides en silicium induit une variation d'indice supplémentaire par effet de dispersion de plasma et un écrantage du champ électrique de modulation, résultant en une diminution de l'efficacité de l'effet Pockels [1]. Nous montrons ici des résultats expérimentaux de modulation électro-optique par effet Pockels sans ambiguïté vis-à-vis de la réponse des charges électriques dans la structure.

## 2. RESULTATS

Pour caractériser le tenseur de susceptibilité non-linéaire d'ordre deux, responsable de l'effet Pockels, nous avons fabriqué des interféromètres de Mach-Zehnder sur lesquels sont déposées des électrodes pour appliquer le champ électrique de modulation dans les guides silicium contraints par une couche de SiN. Nous avons ensuite mesuré la réponse électro-optique du modulateur. Cette réponse est le résultat de la combinaison de la réponse des porteurs et de l'effet Pockels. Deux critères ont été étudiés pour séparer sans ambiguïté ces deux effets. D'une part, une tension constante a été superposée à la composante radio-fréquence de modulation pour étudier l'impact du régime de porteurs sur la réponse. D'autre part, des modulateurs de Mach-Zehnder avec des angles différents par rapport aux directions cristallines du silicium ont été caractérisés car l'effet Pockels dépend de l'orientation cristalline, contrairement à la réponse des porteurs [2].

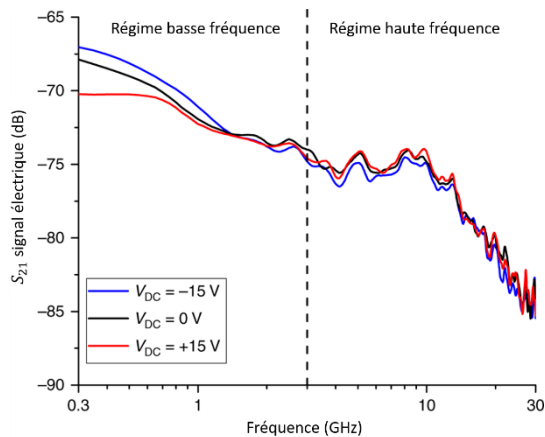


Fig. 1 : Réponse électro-optique pour différentes valeurs de tensions continues

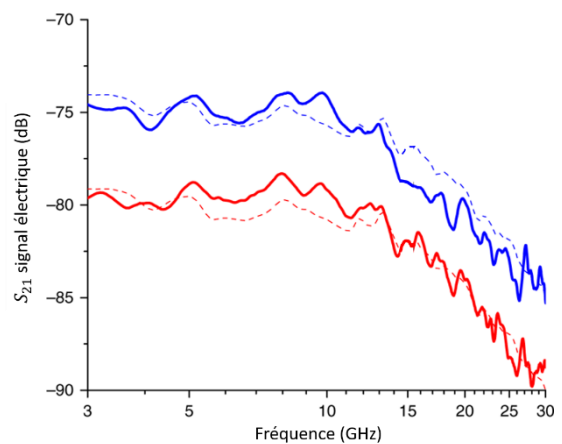


Fig. 2 : Réponse électro-optique pour différentes orientations par rapport à la direction  $[0\bar{1}1]$ . En rouge :  $10^\circ$  ; en bleu :  $40^\circ$ .

La figure 1 montre les réponses obtenues pour différentes valeurs de tension continue. On voit qu'en-dessous de 3 GHz la réponse varie en fonction de la tension continue. Ceci est dû aux différents régimes de porteur (inversion, déplétion et accumulation). En revanche, au-delà de 3 GHz on observe un plateau ne dépendant pas du régime de porteur. Ce plateau correspond alors à la modulation par effet Pockels.

La figure 2 montre les réponses obtenues pour deux orientations différentes du modulateur. On observe une forte dépendance de l'orientation qui ne peut pas être expliquée par les effets de porteurs. Nous assimilons donc les réponses obtenues à l'effet Pockels.

Notre équipe a alors développé un modèle théorique dont les paramètres sont issus de ces résultats [3].

### 3. CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons mené une analyse complète de l'effet Pockels induit par un gradient de déformation et des effets de porteurs dans un modulateur silicium. Nous sommes parvenus à démontrer expérimentalement sans ambiguïté la possibilité d'exploiter l'effet Pockels dans un matériau initialement centro-symétrique. Notre modèle théorique ainsi développé appréhende la corrélation entre les déformations de la maille cristalline et la réponse électro-optique induite par l'effet Pockels.

Ce projet a reçu des financements du Conseil Européen de la Recherche sous le programme Horizon 2020 de l'Union Européenne (ERC POPSTAR – accord No 647342). La fabrication des échantillons a été réalisée à la centrale technologique du C2N et ce travail a été soutenu par le réseau français RENATECH.

### RÉFÉRENCES

- [1] S. Sharif Azadeh et al., "On the measurement of the Pockels effect in strained silicon", Optics letters vol. 40, pp. 1877-1880 (2015)
- [2] M. Berciano et al., "Fast linear electro-optic effect in a centrosymmetric semiconductor", Communications Physics vol. 1, Article number: 64 (2018)
- [3] P. Damas et al., "Comprehensive description of the electro-optic effects in strained silicon waveguides", Journal of applied physics vol. 122, 153105 (2017)