

MODULATEUR ELECTRO-OPTIQUE LARGE-BANDE A BASE DE GRAPHENE SUR RESONATEUR OPTIQUE PLANAIRE

**Thomas Wood, Jérémy Lhuillier, Pierre Demongodin, Malik Kemiche, Bertrand Vilquin,
Pedro Rojo Romeo, Ali Belarouci, Ségolène Callard, Christelle Monat**

Université de Lyon, Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL), CNRS, UMR 5270, École Centrale de Lyon, 69134 Écully, France

thomas.wood@ec-lyon.fr

RÉSUMÉ

Un modulateur électro-optique formé d'un condensateur exploitant deux feuillets de graphène surmontant un miroir de Bragg est présenté. Il présente un contraste de modulation de 20% sur une plage spectrale d'environ 400nm dans le proche infrarouge pour une variation de tension appliquée entre -2 et 2V.

MOTS-CLEFS : *graphène ; modulateur ; optoélectronique ; optique intégrée*

1. INTRODUCTION

Depuis l'isolement de monocouches de graphène en 2004, des efforts conséquents ont été fournis pour incorporer ce matériau 2D dans des composants optiques tels que des modulateurs, des convertisseurs de fréquence et des horloges optiques. En effet, le graphène présente certaines propriétés optiques remarquables, telles qu'une absorption optique constante sur une plage spectrale large, qui a été mesurée sous incidence normale (couplage depuis l'espace libre) et sous incidence rasante (applications à des guides d'ondes). Le graphène supporte également l'existence d'ondes surfaciques de type plasmon-polariton, et sous-tend une variété d'effets non-linéaires, notamment l'absorption saturable et des phénomènes de mélanges/ conversions de photons de longueurs d'onde différentes. Ces propriétés optiques peuvent être activées et désactivées pour une longueur d'onde donnée par le «dopage» du graphène en utilisant les mêmes techniques de mise sous tension développées pour la microélectronique. A titre d'exemple, dans le cas de la modulation d'absorption, il faut décaler le niveau de Fermi de telle sorte que sa séparation en énergie du point de Dirac (appelé le potentiel chimique) soit égale à au moins la moitié de l'énergie du photon afin de rendre le graphène transparent. Néanmoins, à cause de son épaisseur égale à une monocouche atomique, l'interaction entre le graphène et la lumière le traversant sous incidence normale reste limitée, et son absorption maximale plafonne à 2,3% dans des conditions d'excitation de type espace libre.

Diverses techniques ont été proposées dans la littérature pour surmonter les limitations imposées par cette absorption intrinsèque du graphène, qui réduit le contraste atteignable pour les modulateurs électro-optiques à base de graphène. Les solutions envisagées ont notamment consisté à utiliser du graphène multicouche pour augmenter le nombre de passages de la lumière à travers des feuilles de graphène simples [1] ou à exploiter des structures résonantes pour confiner l'énergie optique au voisinage de la couche de graphène [2,3]. Jusqu'à présent, la majorité de ces structures résonantes reposaient sur l'établissement de modes de surface en régime de couplage critique par des réseaux de diffraction unidimensionnels, donnant des systèmes extrêmement sensibles à l'absorption dans le graphène et dont les contrastes de modulation approchent les 100%. L'inconvénient de ces dispositifs est qu'ils sont hautement sélectifs en longueur d'onde, donnant des largeurs à mi-hauteur de quelques nanomètres pour les pics réfléchis soumis à la modulation, et nécessitant une refonte profonde de la structure afin de décaler la longueur d'onde de fonctionnement.

Dans ce travail, un compromis est trouvé entre le contraste de modulation et la largeur de bande spectrale opérationnelle grâce à l'utilisation d'une structure capacitive formée de deux couches de graphène placées sur un réflecteur de Bragg planaire en TiO_2 / SiO_2 , pour laquelle le plateau de réflectance est centré dans le proche infrarouge. Dans cette configuration, des contrastes de modulation en réflexion de 20% ou plus pour des variations de tension de ± 2 V sont observés sur une plage de longueurs d'onde de ~ 400 nm, pour laquelle la longueur d'onde centrale est déterminée par l'angle de incidence de la lumière sur le système. La conception et la fabrication de la structure optique et l'élaboration du condensateur graphène à double couche

seront détaillées, ainsi que les méthodes de caractérisation optoélectroniques. De plus, des modèles théoriques seront présentés permettant d'établir la dépendance de la réflectance sur la tension de commande.

2. FABRICATION ET RESULTATS

La fabrication du miroir de Bragg est effectuée sur un wafer de Silicium avec une couche surfacique de $2\mu\text{m}$ de SiO_2 thermique, en effectuant des croissances alternées de couches de titane et de silice d'épaisseur quart-d'onde (à 1550nm) par pulvérisation cathodique (à partir de cibles de Ti et Si respectivement). L'empilement est terminé par une couche de silice, dont l'indice est inférieur à celui du titane, afin d'assurer une interférence constructive du champ optique en surface et exalter ainsi l'absorption au niveau du graphène à proximité. Une couche de 10nm de WO_3 est ensuite déposée par pulvérisation cathodique à partir d'une cible stœchiométrique. Ensuite, un monofeuillet de graphène d'une surface d'environ 1cm^2 est transféré sur l'empilement en utilisant la technique de transfert humide préconisée par le fournisseur (ACS Materials), et le PMMA servant de support du graphène est retiré par un recuit à 500°C sous atmosphère $\text{N}_2/\text{H}_2(4\%)$. Par la suite, une partie du graphène est masquée pour permettre la prise ultérieure d'un contact électrique, et une deuxième couche de WO_3 de 10nm est déposée sur la partie restante de la feuille. Une deuxième feuille de graphène est transférée de la même manière que la première sur la couche superficielle de WO_3 , formant ainsi la structure condensateur dont les électrodes sont les deux feuilles de graphène. Une lithographie UV est effectuée pour protéger avec la résine AZ5214 une région rectangulaire d'environ 1mm par 8mm de la surface de l'empilement graphène/ WO_3 /graphène ainsi préservée, le reste étant enlevé à l'aide d'un cycle de plasmas SF_6/Ar (gravant le WO_3) et O_2 (gravant le graphène). Finalement, des contacts d'or épais de 250nm sont déposés par évaporation assistée par faisceau électronique à travers un masque métallique à une vitesse de dépôt moyennant $0,125\text{nm/s}$. Le dispositif final est schématisé sur la Fig. 1 (a).

Les spectres de réflectance spéculaire résolus en polarisation sont mesurés avec un ellipsomètre équipé d'un goniomètre à un angle d'incidence de 55° , pour différentes valeurs absolues et différents signes de polarisation appliquées à l'aide d'un générateur de tension sur les électrodes contactant le condensateur. La variation en réflectivité est maximale pour la polarisation s pour laquelle le champ électrique se trouve entièrement dans le plan des feuilles de graphène ; cette configuration étant reconnue dans la littérature pour favoriser l'absorption dans ce dernier. La tension appliquée au condensateur est variée entre $+2$ et -2V , mettant en évidence une modulation de la réflectance supérieure à 20% sur une gamme spectrale d'environ 400nm , démontrée dans la Fig. 1 (b). Une modélisation est actuellement en cours qui permettra de séparer l'absorption dans les couches de graphène en fonction du potentiel chimique des autres phénomènes optiques, y compris la diffusion aux interfaces. En outre, ces modèles suggèrent que l'origine des « marches » observées dans les spectres de réflectance résolus en tension (comme celles visibles dans la Fig. 1 (c) autour de $\pm 0,7\text{V}$) sont dues à la rapide (dé-)population des bandes d'énergie du graphène près du point de Dirac en raison de la densité linéaire d'états dans le voisinage de ce dernier.

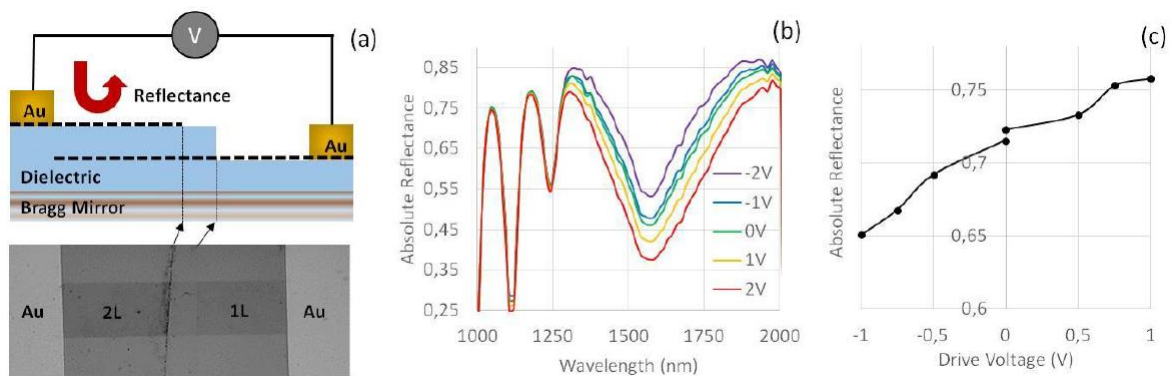


Fig. 1 : (a) structure globale du condensateur à base de deux feuilles de graphène (en pointillés) sur miroir de Bragg, vue en coupe et photographie en surface. (b) Variation de réflectance spéculaire en polarisation s avec un angle d'incidence de 55° en fonction de la tension appliquée. (c) Réflectance à 1400nm en fonction de la tension appliquée.

3. PERSPECTIVES

Fort des compétences acquises lors de la mise au point du modulateur décrit précédemment, l'essentiel des efforts est maintenant concentré sur l'intégration des condensateurs de graphène dans les composants d'optique guidée. Dans ce contexte, on s'attend non seulement à pouvoir fabriquer des guides modulateurs exploitant le dopage par injection électrique afin de faire basculer le graphène entre ses états transparent et absorbant, mais aussi de favoriser d'autres processus optiques qui sont exaltés lorsque l'interaction entre les photons guidés et les électrons du graphène devient résonant. De tels processus incluent la mélange à quatre ondes ou encore la conversion de fréquences. Bien que l'absorption linéaire d'un guide d'ondes comportant des inclusions de graphène soit importante, la faible valeur absolue des susceptibilités du deuxième et troisième ordre qui déterminent le rendement de conversion pour les phénomènes précités nous a conduit à exploiter des régimes de lumière lente afin d'augmenter l'interaction entre le champ du mode guidé et le graphène. Pour cela, la dispersion dans des guides à section variant de manière périodique a été optimisée, ouvrant la voie à la réalisation de modulateurs compacts en optique guidée.

4. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été financés par : European Research Council H2020 Consolidator Grant GRAPHICS (n°648546).

RÉFÉRENCES

- [1] Z. Sun, A. Martinez, and F. Wang, "Optical modulators with 2D layered materials", Nat. Photonics 10 (227), 2016.
- [2] G. Sui, J. Wu, Y. Zhang, C. Yin, and X. Gao, "Microcavity-integrated graphene waveguide: a reconfigurable electro-optical attenuator and switch", Sci Rep 8 (12445), 2018.
- [3] T. Sun, J. Kim, J.M. Yuk, A. Zettl, F. Wang, and C. Chang-Hasnain, "Surface-normal electro-optic spatial light modulator using graphene integrated on a high-contrast grating resonator", Opt Exp 24 23 (26035), 2016.