

Tour d'horizon des possibilités du Silicium : de l'électronique aux dispositifs de récupération d'énergie et capteurs micro-usinés

O. De Sagazan, Ch. Lebreton, M. Harnois, T. Mohammed Brahim, E. Jacques

CCMO, Centre Commun de Microélectronique de l'Ouest, Université de Rennes 1
Campus de Beaulieu, 35042 Rennes cedex, France

olivier.de-sagazan@univ-rennes1.fr, christophe.lebreton@univ-rennes1.fr,
maxime.harnois@univ-rennes1.fr, tayeb.brahim@univ-rennes1.fr, emmanuel.jacques@univ-
rennes1.fr

Un jeu de masques est réalisé permettant aux étudiants de fabriquer un système intégré comportant différentes fonctions de détection et une électronique de traitement en utilisant une technologie silicium associée à de la microtechnologie. Le but est de faire prendre conscience aux étudiants de la très grande diversité d'applications que peut fournir un système intégré silicium.

Mots-clés : Electronique silicium, Technologie silicium, microtechnologie, système intégré, détection.

1. Introduction

Le besoin de systèmes intégrant des fonctions de détection, de traitement de données et tenant compte de contraintes d'énergie autonome a conduit le CCMO à proposer un design permettant aux étudiants de fabriquer simultanément des composants électroniques (diode PN, MOSFET N et P), des composants de récupération d'énergie (cellule photovoltaïque et cellule Peltier) et des capteurs thermiques (ponts de Wheatstone). Certains MOSFETs pouvant servir de capteurs de pression sont fabriqués sur membrane définie par gravure chimique anisotropique. De plus le jeu de masques permet la fabrication de résonateurs électrostatiques.

Le panel de possibilités offertes par ce design permet aux étudiants d'appréhender simultanément les problématiques des fonctions électroniques habituelles et des fonctions de détection. Le choix du procédé dépend des intérêts des formations pour des fonctions données et de leurs possibilités matérielles (temps alloué à la formation).

Le jeu de masques donne aux étudiants la très grande diversité des fonctions possibles en continuant à utiliser la technologie silicium dont la fin est annoncée depuis des décennies.

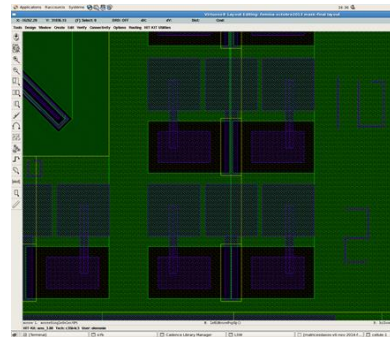
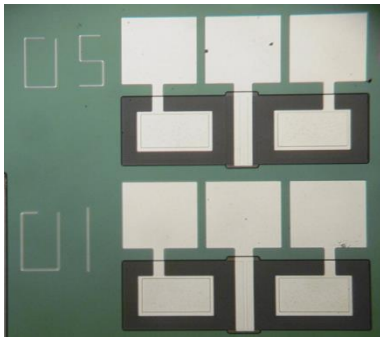
2. Réalisation Technologique

La réalisation technologique s'effectue au sein de la plateforme technologique du CCMO (Centre Commun de Microélectronique de l'Ouest). Les étudiants mettent en œuvre les principales étapes technologiques habituelles de la microélectronique et ceux de la microtechnologie. Ils utilisent des techniques de test physique et électrique pour valider les étapes.

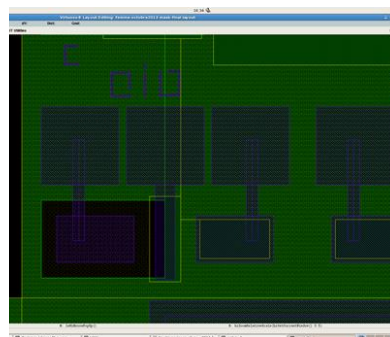
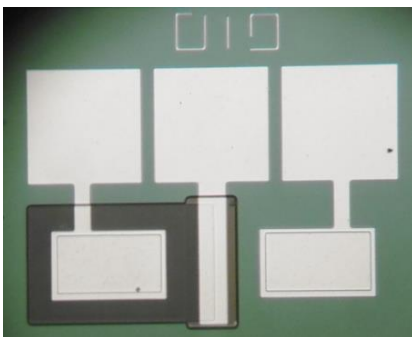
1. Oxydation thermique du silicium à haute température (oxydation sèche ou humide et vérification par spectroscopie ellipsométrique)

2. Dopage par pré-dépôt et diffusion à partir de plaquettes de Nitrure de bore (type P) ou de nitrure de phosphore (type N) (Caractérisation du dopage par mesure de résistivité 4 pointes, Mesure de la caractéristique courant-tension de la diode)
3. Photolithographie et alignement de 3 à 5 niveaux de masquage (en face avant et face arrière)
4. Dépôt de nitrure de silicium par PECVD ou LPCVD
5. Dépôt de métaux par effet Joule ou canon à électron
6. Gravure sèche RIE
7. Micro-usinage de volume du silicium par gravure anisotropique humide
8. Caractérisation électrique sous pointes

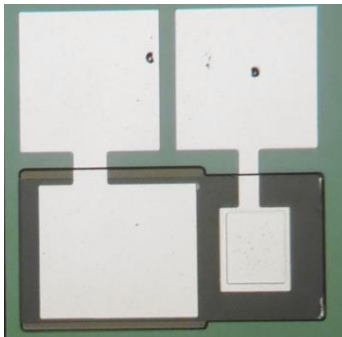
La figure (1) montre les différents dispositifs prévus dans les masques avec l'idée de pouvoir réaliser plusieurs simultanément.



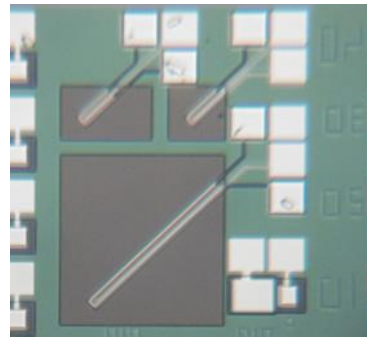
Transistors MOS de différentes dimensions



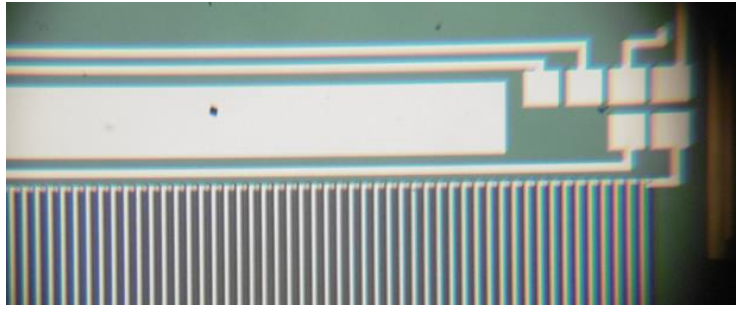
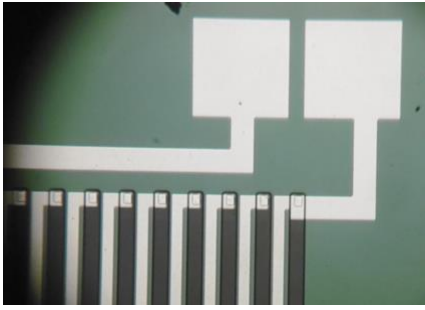
Diodes PN utilisant le design des transistors



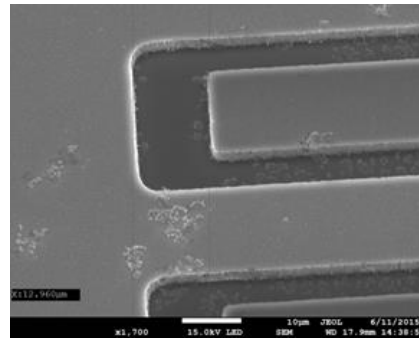
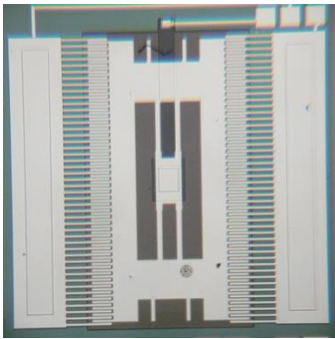
Capacités MOS utilisant le design des transistors et l'oxyde de grille comme isolant



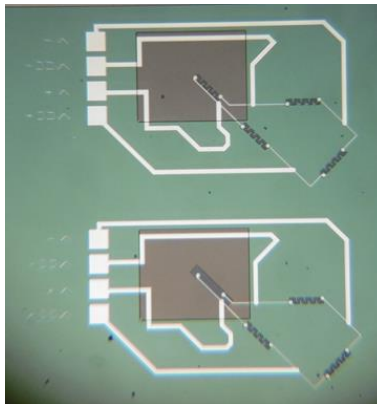
Transistor MOS (en diagonale) porté par une membrane fine. La membrane est réalisée par gravure chimique anisotropique de la face arrière (alignement face arrière). Ce transistor peut servir comme capteur de pression.



Cellule Peltier composée d'une alternance de barrettes de silicium dopé N et de barrettes en aluminium. Ces barrettes reliées deux a deux forment un serpentins de plusieurs dizaine de cm de long. La cellule peut servir à la récupération d'énergie thermique ou de capteur de température.



Résonateur électrostatique à base d'aluminium utilisant une résine comme couche sacrificielle ou à base de polysilicium utilisant un oxyde de silicium déposé ou du germanium comme couche sacrificielle. La gravure de l'aluminium se fait en plasma chloré en ICP RIE



Pont de Wheatstone composé de 4 résistances réalisées par diffusion. L'une des résistances est fabriquée sur une membrane fine. Le pont peut être utilisé comme capteur de pression.

Fig.1. Différents dispositifs prévus dans le jeu de masques.

3. Exemples de résultats

Diode PN et cellule solaire photovoltaïque

L'étudiant fabrique et caractérise la cellule solaire photovoltaïque basée sur une diode PN. Il détermine ensuite les principaux paramètres que sont le facteur de forme et le

rendement. La figure 2 donne la caractéristique d'une cellule solaire sans couche reflet, à l'obscurité et sous lumière. On peut noter le bon facteur de forme FF obtenu. Une couche antireflet en nitrure de silicium déposé par PECVD pourra être ajoutée en fonction du temps prévu par la formation. La cellule pourra être caractérisée avant et après couche reflet, soit juste pour montrer l'intérêt d'une couche reflet, soit, et suivant la nature de la formation, faire une étude plus approfondie sur le lien entre les longueurs d'onde reçues, la nature de la couche et son épaisseur. Dans ce cas au moins des couches de différentes épaisseurs ou utilisant d'autres isolants seront déposées sur des dispositifs identiques.

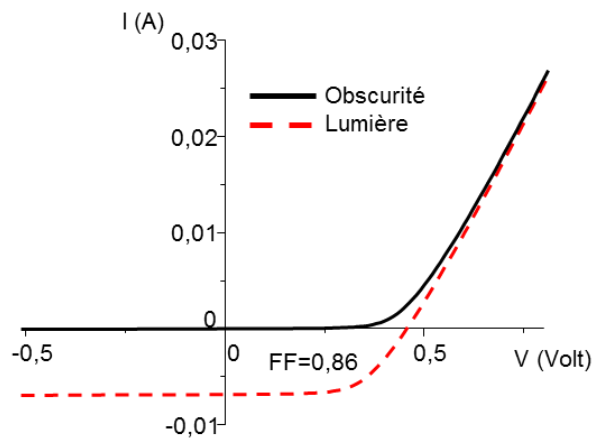


Fig.2. Caractéristique d'une cellule solaire composée d'une diode PN sous obscurité et sous lumière.

Cellule Peltier

Après avoir fabriqué la cellule, l'étudiant vérifiera la possibilité d'obtenir un signal électrique à partir d'un gradient de température. La figure 3 montre un exemple d'apparition d'une tension sous l'effet de l'application d'un gradient de température. Le signe de la tension change avec celui du gradient de température. Ici aussi, l'étude sera plus ou moins approfondie suivant la nature de la formation.

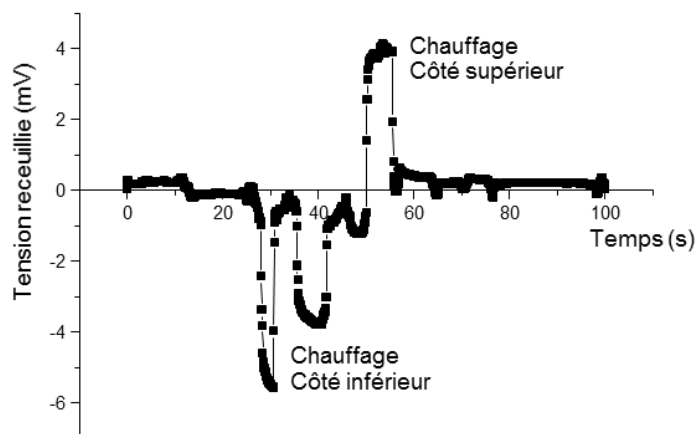


Fig.3. Tension apparaissant aux bornes de la cellule Peltier fabriquée sous l'effet de l'application d'un gradient de température

Ces 2 exemples de cellules fabriquées simultanément donnent une idée de la possibilité de récupération d'énergie par différents moyens. Il s'agit de faire prendre conscience à

l'étudiant de la nécessité pour les systèmes portables d'une récupération multiple d'énergies différentes. Les rendements étant faibles, une seule source sera insuffisante.

Transistor NMOS

Les transistors peuvent être caractérisés par leur comportement statique en traçant les caractéristiques de transfert courant de drain-tension de grille et de sortie courant de drain-tension de drain. Les paramètres tels que la tension de seuil et la transconductance seront déduits. Une caractérisation fréquentielle pourra aussi être réalisée. La figure 4 montre un exemple de caractéristique de transfert d'un transistor NMOS réalisé par des étudiants.

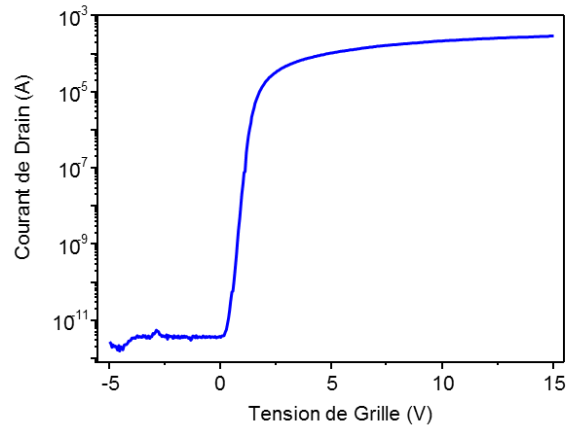


Fig.4. Exemple de caractéristique de transfert d'un transistor NMOS Transistor PMOS porté par une membrane fine comme capteur de pression

La réalisation de ce transistor sur membrane permet aux étudiants de se familiariser non seulement avec la technologie microélectronique mais aussi à des étapes spécifiques à la microtechnologie comme l'alignement face arrière et la gravure électrochimique. La caractérisation de l'effet d'une force appliquée sur la membrane sur la caractéristique de transfert du transistor peut consister en la visualisation de son déplacement croissant avec la pression uniquement (Figure 5) ou en une étude complète de la sensibilité du capteur et de son retour à 0.

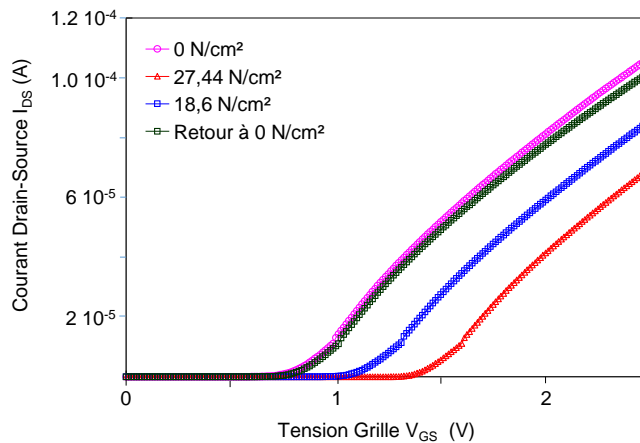


Fig.5. Exemple de déplacement de la caractéristique de transfert d'un transistor PMOS sur membrane sous l'effet d'une pression croissante et de son retour en supprimant la pression.

4. Bilan

L'originalité de ce TP réside dans la prise de conscience par l'étudiant de :

- l'intégration de différentes fonctions physiques et électroniques dans un même composant,

- la possibilité de fabrication simultanée de ces différentes fonctions en utilisant des techniques usuelles de la microélectronique renforcées par des techniques de microtechnologie

- la possibilité de récupération d'énergie et de ses limites pouvant être dépassées par l'adjonction de différentes sources thermiques, mécaniques et optiques.

L'autre originalité réside dans l'aspect modulaire du TP. Il est possible de réaliser 1 ou 2 dispositifs pour un besoin d'une formation technologique uniquement. Le choix du ou des dispositifs relevant des connaissances antérieures des étudiants et du temps alloué à la formation.

Il est possible de s'intéresser plus à l'aspect compréhension physique du dispositif et réaliser des dispositifs identiques en faisant varier quelques paramètres technologiques.

Il est aussi possible de s'intéresser à l'aspect performance des dispositifs (performance électrique ou performance applicative pour les capteurs et cellules). Ceci est particulièrement vrai pour les dispositifs de récupération d'énergie.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'ensemble des membres du CCMO pour leur implication dans la mise en place des TP présentés, le GIP-CNFM ainsi que l'ANR IDEFI FINMINA (11) pour les co-financements apportés pour développer ces nouvelles approches pédagogiques.