

POLYSYST : Du capteur aux Systèmes Intégrés

Jérôme LUBIN⁴, Thierry CAMPS¹⁴, François GUERIN², Christiane DUPRAT²,
Christophe CAPELLO², Cherif ROUABHI², Frédéric GESSINN², Jean-Marie DORKEL²³⁴
Jacques DEGAUQUE²³, Mohamed MATMAT⁴, Jean-Yves FOURNIOLS³⁴.

1 : Université Paul SABATIER TOULOUSE III, 2 : A.I.M.E.,
3 : I.N.S.A.T., 4 : L.A.A.S. C.N.R.S.

E-mail : jerome.lubin@laas.fr

Introduction

La présence des microsystèmes dans notre quotidien est de plus en plus marquée. Initialement utilisée par le secteur automobile pour la détection de chocs nécessitant le déclenchement des airbags, on les retrouve aujourd'hui dans les têtes d'impression à jet d'encre ou encore dans certaines consoles de jeux. De nouveaux marchés sont également en pleine expansion notamment liés à l'essor de la microfluidique ouvrant de nombreuses perspectives pour les analyses biomédicales et les microréacteurs chimiques.

Le projet **POLYSYST** permet à l'étudiant d'aborder par la pratique, la réalisation et la caractérisation de matériaux et de composants ainsi que de s'initier aux concepts microsystème. Il illustre également la possibilité de faire cohabiter au sein d'un même wafer des composants discrets, des capteurs, des dispositifs à adressage individuel ou matriciel ainsi qu'une électronique de prétraitement du signal.

Même si dans notre cas, la couche mince semi-conductrice employée est en polysilicium, il est possible de la remplacer par un autre film mince inorganique (métal, oxyde métallique, autre semiconducteur) ou organique (polymères,...).

Public concerné

Ce projet s'adresse à différents niveaux (de L3 à M2) du cursus universitaire des grands établissements Toulousains (Université Paul Sabatier, INSA, INP). Il sera également proposé à toutes formations souhaitant aborder le domaine des cap-

teurs, actionneurs et d'une manière plus générale, des « microsystèmes ».

Plusieurs études peuvent être menées et leur contenu s'adaptera aux objectifs pédagogiques des formations concernées. On peut les décliner en trois grands thèmes:

I Caractérisation matériau et technologie

De nombreux motifs sont dédiés à initier l'étudiant à la caractérisation des matériaux. Certains d'entre eux sont plus orientés vers l'aspect « technologie » et permettent le contrôle en cours et/ou en fin de process des caractéristiques des couches déposées. On peut ainsi mesurer les épaisseurs des couches déposées, la maîtrise des cotes pour évaluer la surgravure (écart entre les dimensions réelles des motifs et les dimensions dessinées sur les masques). Certains motifs permettent d'observer l'évaluation de l'étape de libération.

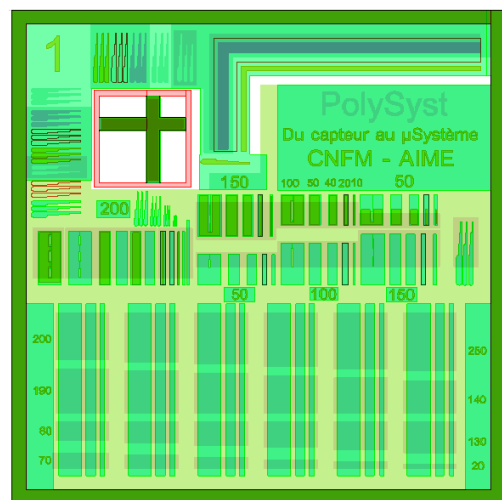


Figure 1 : puce servant à la caractérisation des matériaux du point de vue technologique.

D'autres motifs visent la caractérisation électrique des matériaux. Sans être exhaustive, cette large palette de tests permettra à l'étudiant de se familiariser avec les techniques de la microélectronique et illustrera une méthodologie de tests électriques sur des dispositifs élémentaires permettant d'accéder au paramètre physique désiré. On y retrouve l'étude de matériaux isolants (diélectriques) ainsi que la conduction électrique dans un matériau en film mince.

Les motifs TLM (*Transfer Length Method*), permettent de caractériser finement l'interface métal/semiconducteur et ainsi sensibiliser l'étudiant à l'impact du design sur la résistance de contact.

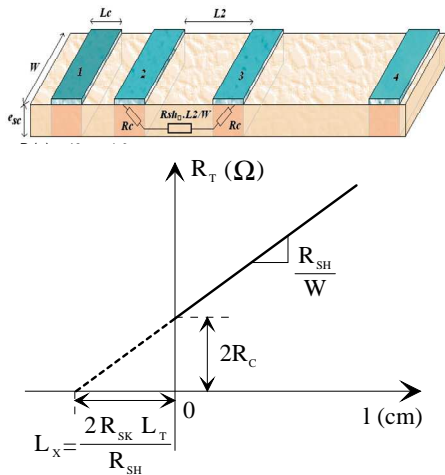


Figure 2 : motif TLM et sa caractéristique résistance/longueur de semiconducteur

Ce sera aussi l'opportunité de montrer une autre méthode de mesure de résistivité du polysilicium et de visualiser la notion de résistance par carré.

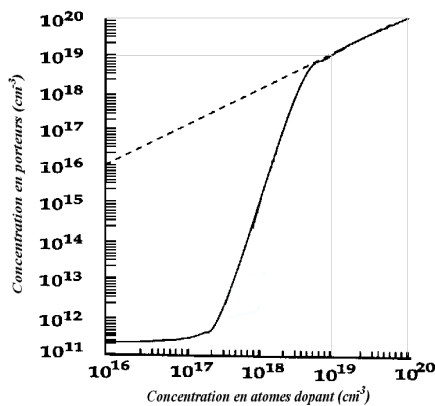


Figure 3 : dopage effectif avec la concentration en dopants dans le polysilicium

En modifiant le niveau de dopage des zones P implantées on pourra aussi observer l'effet du niveau de dopage sur la résistivité de films et constater qu'elle n'est proportionnelle à la dose implantée qu'au delà d'une concentration d'environ 10^{19} cm^{-3} comme l'illustre la Figure 3.

II Composants discrets

Ce thème s'adresse principalement aux formations qui abordent la physique des semi conducteurs.

Parmi les composants proposés certains sont directement implémentés dans le substrat de silicium. C'est entre autres le cas des transistors et des capacités MOS.

Les autres composants emploient une couche semiconductrice de $1 \mu\text{m}$ de polysilicium. Il s'agit de diodes PN et d'éléments à seuils symétriques (ESS), constitués d'alternance de zones NPN ou PNP. Compte tenu du niveau très élevé des dopages dans le film polysilicium (cf. Figure 3), les diodes sont de type Zéner. Notons que la tension de Zéner peut également être ajustée en associant plusieurs diodes en série.

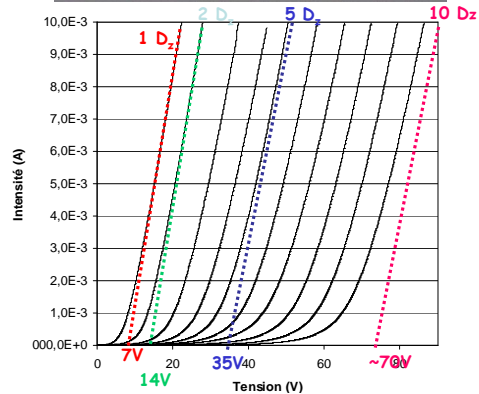
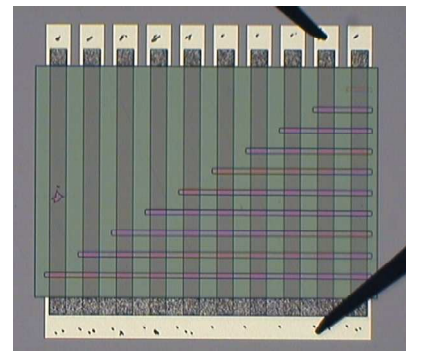


Figure 4 : ajustement de la tension de Zéner par la mise en série de diodes

III Capteurs et Microsystèmes

Dans cette partie nous ferons appel aux éléments à seuils symétriques.

Pour l'aspect capteur, nous exploitons la très forte sensibilité des caractéristiques électriques aux variations de grandeurs physiques (température, éclairage, pression). La sensibilité, notamment en température, est particulièrement élevée si l'on se place à bas régime de polarisation où la conduction surfacique est prépondérante.

Dans cette partie nous introduisons la notion de capteur générique sur la Figure 5.

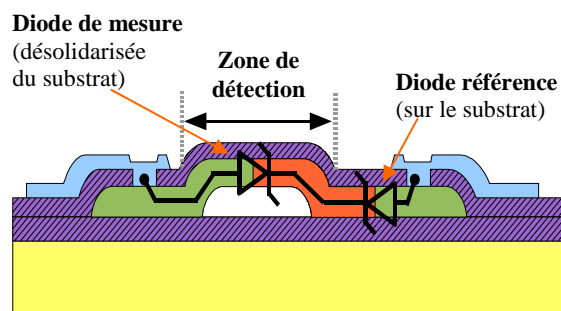


Figure 5 : Principe d'un capteur générique.

Ce capteur est formé d'un ESS (zones NPN implantées et/ou diffusées) dans un film de polysilicium. La jonction PN désolidarisée du substrat sera baptisée diode de détection et s'affranchira des effets de substrat (inertie thermique, courant de substrat,...). L'autre jonction ancrée sur le substrat, correspondra à la diode de référence et sa caractéristique ne sera affectée que par les variations de la température ambiante.

A présent, pour s'affranchir des dérives thermiques, nous proposons l'instrumentation générique illustrée sur la Figure 6.

En effet en appliquant un signal constitué de pulses alternatifs on sonde le courant inverse de la diode de détection et celle de référence. Ainsi, à l'aide d'un simple dipôle on peut mesurer différentes grandeurs physiques en s'affranchissant des variations de son environnement.

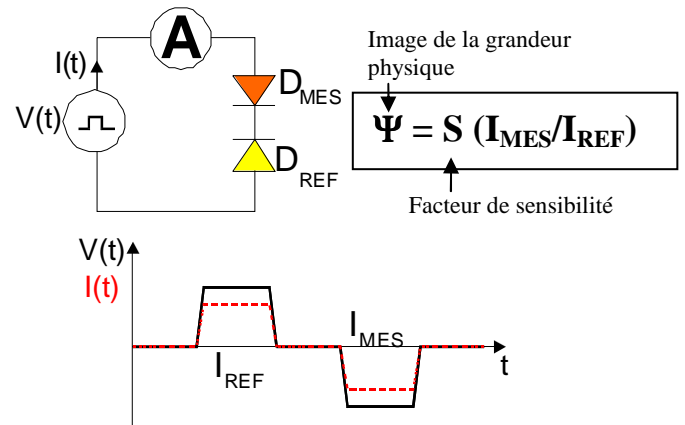


Figure 6 : principe de la détection générique.

Processus technologique

L'enchaînement des étapes technologiques du process PolySyst est illustré sur la figure 7. En partant d'un substrat de silicium (P-) de diamètre 2 pouces, on débute par une oxydation sèche de la surface de 1000Å d'épaisseur qui servira de diélectrique de grille pour les transistors et capacités MOS fabriqués dans le substrat.

Après le dépôt de Germanium et sa délimitation par RIE, nous déposons par LPCVD une couche de polysilicium (~250nm) suivie de 100nm d'oxyde (LTO).

Le rôle de cet oxyde sera d'empêcher, lors du dopage par diffusion à haute température, l'interdiffusion de la couche semi-conductrice polysilicium avec la couche sacrificielle germanium. Ce mélange perturbe l'étape de libération à l'eau oxygénée, la rendant impossible au delà d'un taux de silicium de 40%.

De son côté la première couche de polysilicium évite que la diffusion de l'excès d'oxygène présent dans l'oxyde et qui provoquerait la formation d'un gaz (GeO) responsable de la destruction des couches polysilicium déposées par-dessus. Cette couche doit être suffisamment fine pour limiter la présence de silicium dans la couche sacrificielle et suffisamment épaisse pour ne pas disparaître totalement avant l'élimination de l'excès d'oxygène. L'étude et l'optimisation de l'épaisseur de

ces couches est en cours. D'autres matériaux tels que le nitrure de silicium ou NIDOS (silicium dopé azote) seront bientôt testés.

Une fois les deux couches d'isolation déposées, nous procéderons à un recuit de (1h à 900°C) pour exo-diffuser l'oxygène en excès dans le LTO. On procède ensuite au dépôt LPCVD de 1µm de polysilicium, suivi d'une implantation de bore pleine plaque avec une énergie de 50 keV.

Après le dépôt LTO de 0.5µm d'oxyde de masquage, on ménage par photogravure les ouvertures de diffusion. A ce stade du process, l'ensemble des îlots de germanium sont entièrement encapsulés.

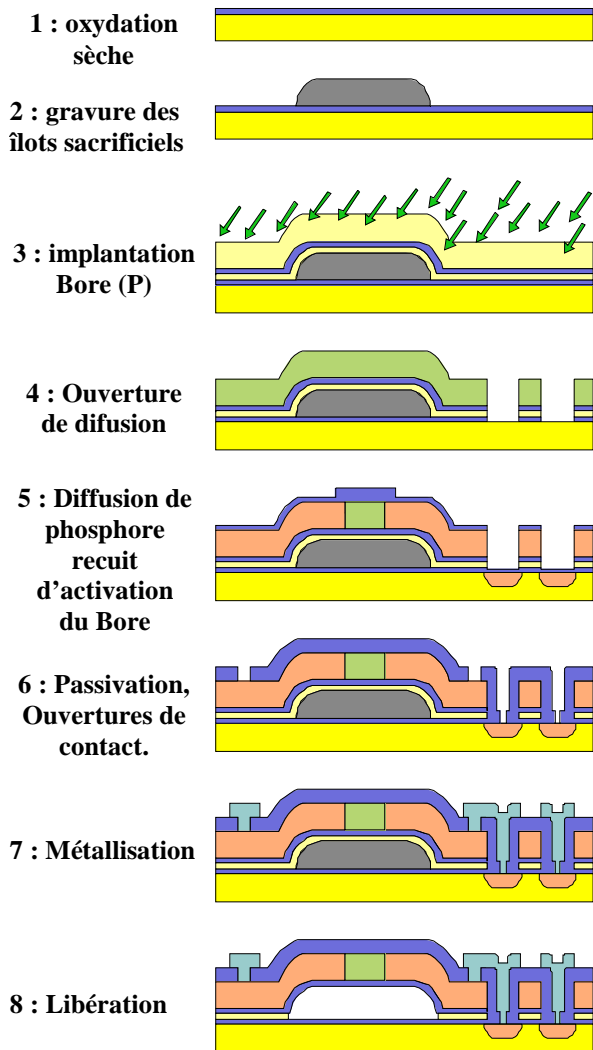


Figure 7 : processus de réalisation PolySyst

Le dopage par diffusion thermique s'effectue à 1000°C pendant une heure et permet le dopage localisé de type N⁺ de zones dans le polysilicium et le substrat mais également la redistribution des ions bore implantés précédemment.

On passive ensuite la surface du wafer avec un oxyde LTO de 250nm. Puis l'on procède par photogravure à l'ouverture des contacts suivie d'un dépôt pleine plaque de la métallisation Aluminium.

Enfin, délimitation des motifs métalliques par photogravure, on délimite les futures zones suspendues. Pour cela après photolithographie, on grave les zones latérales polysilicium par RIE pour bien mettre à nu le germanium.

Pour finir, il ne reste plus qu'à plonger le wafer dans un bain d'eau oxygénée chauffée à 80°C pour graver tous les îlots de germanium. La vitesse de gravure dépend fortement du taux de silicium présent dans les motifs sacrificiels et peut durer plus d'une heure. Le rinçage à l'eau puis à l'éthanol sera suivi d'un séchage par centrifugation.

Conclusion et perspectives

Le projet PolySyst présenté à pour objectif d'initier les étudiants, venus de diverses formations à la réalisation de micro-systèmes. Ils pourront se former à la caractérisation matériau couramment utilisés en microélectronique, à la fabrication et à la caractérisation de composants discrets, d'une électronique de prétraitement du signal ainsi que des capteurs et des actionneurs. Le large éventail de motifs proposés permet à chaque enseignant d'adapter le contenu et le niveau du TP à la filière qu'il encadre.