

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présentée par

KOUCHIH HANANE

pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique spécialité Microélectronique
Microsystèmes et Conception de Circuits

Thème

**Etude et simulation sous COMSOL de
microstructures antireflet, multicouches pour un
photocapteur à double jonction**

Proposé par : Dr NACEUR.D

Année Universitaire 2015-2016

REMERCIEMENTS

Je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience pour accomplir ce modeste travail jusqu'à sa finalité.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma promotrice madame **NACEUR Djamila**, pour m'avoir encadré, pour la confiance qu'elle a placée en moi, pour ses précieux conseils, son soutien et sa disponibilité durant la préparation de ce présent travail.

J'exprime mes sincères remerciements au doctorant **RELLAM Wahid** pour tous ses conseils, et pour tout ce qu'il m'a appris tout au long de ce travail.

Mes remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.

Je remercie infiniment mes très chères parents que dieu les protège, ainsi que mes frères et mes sœurs pour leurs sacrifices, leurs tendresses et leurs amours.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de mes vifs remerciements.

DÉDICACES

Je dédie le présent mémoire :

A mon père

A ma mère pour leur affection et leur amour.

A mes frères et mes sœurs pour leurs encouragements. A toute ma famille.

A tous mes amis. A tous ceux et celles que j'aime de près comme de loin.

A tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

ملخص:

دفعن هيكل تقاطع المزدوج. كمية BDJ تقاطع PN باستخدام تقنية كشف اللون جديدة تسمى المزدوجة دراسة ل الفوتونات اختراق جهاز استشعار تعتمد على انعكاسية سطحه. والسمة الانعكاسية لكمية الفوتونات المنعكس من السطح، أو خسارة من الإشعاع الحادث. لتقليل انعكاس للضوء السطح، وتغطي هذه الأخيرة مع طبقة المضادة هو الحد من استشعار للانعكاس (المضادة للانعكاس الطلاء) أو أكثر من طبقات المضادة للانعكاس. دور طبقة انعكاسية. هذه الطبقة يقلل من التفكير، عن طريق الحد من خسائر التفكير في أقل من 2٪. وتستخدم الطبقات المختلفة المضادة للانعكاس، فإنها يمكن أن العازلة مثل TiO_2 , SiO_2 , MgF_2 et CeF_3 .

كلمات المفاتيح: ZrO_2 , MgF_2 , CeF_3 , SiO_2 ، طبقة المضادة ، طبقة BDJ

Résumé : Etude d'un photocapteur utilisant une nouvelle technique de détection de couleurs dite structure à double jonctions PN ou Buried double junction **BDJ**. La quantité de photons pénétrant ce capteur dépend de la réflectivité de sa surface. La réflectivité caractérise la quantité de photons réfléchi par la surface, soit une perte du rayonnement incident. Pour minimiser la réflexion de la lumière en surface, cette dernière est recouverte d'une couche anti-réfléchissante (Anti-Reflective Coatings) ou de plusieurs couches anti-réfléchissantes. Le rôle de la couche antireflet est de réduire la réflectivité de capteur. Cette couche réduit au minimum la réflexion, en ramenant les pertes de réflexion à moins de 2%. Différentes couches anti réfléchissantes sont utilisées, elles peuvent être isolantes comme le TiO_2 , SiO_2 , MgF_2 et CeF_3 ou conductrice comme le ZnO .

Mots clés : BDJ, couche antireflet, SiO_2 , CeF_3 , MgF_2 , ZrO_2 .

Abstract : Study of a photo-sensor structure using a new technique for color detection called double PN junctions or buried double junction **BDJ**. The quantity of photons penetrating the sensor depends on the reflectivity of its surface. To minimize reflection of the surface, the latter is covered with an anti-reflective layer (Anti-Reflective Coatings) or more than one anti-reflective layer. The role of the anti reflection layer is to reduce the reflectivity of the sensor. This layer minimizes reflection, by reducing the reflection loss less than 2%. Different anti-reflective layers are used such as TiO_2 , SiO_2 , MgF_2 and CeF_3 or as ZnO .

Keywords : BDJ, Anti-Reflective Coating, SiO_2 , CeF_3 , MgF_2 , ZrO_2 .

Listes des acronymes et abréviations

| | |
|-------------|---|
| BDJ | Buried Double Junction |
| BTJ | Buried Triple Junction |
| CMOS | Complementary Metal Oxyde Semiconductor |
| CCD | Charge-Coupled Device |
| Mg | Magnésium |
| Ce | Cérium |
| F | Fluorure |
| Si | silicium |
| Zr | Zirconium |
| n | indice de réfraction |
| R | Coefficient de réflexion |
| CAR | Anti-Reflective Coatings |

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Introduction générale | 01 |
| | |
| Chapitre I | |
| I.1 Introduction | 04 |
| I.2 Les détecteurs optiques intégrés sur silicium | 04 |
| I.2.1. Le photoconducteur | 04 |
| I.2.2. Le photo-condensateur | 05 |
| I.2.3. Les photodétecteurs à jonction | 05 |
| I.2.3.1 La photodiode | 06 |
| I.2.3.2 La photodiode à avalanche | 07 |
| I.2.3.3 La photodiode PIN | 07 |
| I.2.3.4 Les photodiodes à jonctions enterrées | 08 |
| I.2.3.5 La photodiode Schottky | 09 |
| I.2.3.6 Le phototransistor | 09 |
| I.3 Les capteurs d'images intégrés sur silicium | 09 |
| I.3.1 Capteurs CCD | 10 |
| I.3.2 Capteurs CMOS | 11 |
| I.3.3 Comparaisons entre les capteurs CCD et CMOS | 12 |
| I.4 Conclusion | 13 |
| | |
| Chapitre II | |
| II.1 Introduction | 15 |
| II.2 Structure du capteur à double jonction enterrée BDJ | 15 |
| II.2.1 Principe de fonctionnement..... | 16 |
| II.2.2 Le coefficient de réflexion | 19 |

| | |
|--|----|
| II.2.3 Taux de génération des paires électrons trous | 20 |
| II.2.4 Courant photonique et courant d'obscurité | 22 |
| II.2.4.1 Courant photonique | 22 |
| II.2.4.2 Courant d'obscurité | 24 |
| II.3 Structure du capteur à triple jonction enterrée BTJ | 25 |
| II.4 Conclusion | 27 |
| Chapitre III | |
| III.1 Introduction | 28 |
| III.2 La structure utilisée | 28 |
| III.3 Les propriétés optiques | 29 |
| III.3.1 L'indice de réfraction | 29 |
| III.3.2 Le coefficient d'absorption | 30 |
| III.3.3 La réflectance | 31 |
| III.4 Le traitement antireflet | 31 |
| III.5 Antireflets multicouches | 34 |
| III.6 Conclusion | 37 |
| Conclusion générale | 38 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I.1 Principe de fonctionnement typique d'un photoconducteur, constitué d'un semi-conducteur dopé N | 5 |
| Figure I.2 Illustration du principe d'accumulation de charges d'un photo-condensateur | 5 |
| Figure I.3 Coupe transversale et symbole d'une photodiode verticale P + /N (à gauche) et Réponse spectrale des photodiodes idéale et réelle (à droite)..... | 6 |
| Figure I.4 Vue en coupe d'une photodiode PIN | 8 |
| Figure I.5 Illustration du capteur à triple jonction enterrée BTJ | 9 |
| Figure I.6 Coupe transversale d'un phototransistor bipolaire vertical | 10 |
| Figure I.7 principe de fonctionnement des capteurs CCD | 11 |
| Figure I.8 Disposition des différentes parties composantes les capteurs CMOS | 11 |
| Figure II.1 coupe transversale d'une structure BDJ implémenté dans un processus CMOS | 14 |
| Figure II.2 illustration simplifié du capteur BDJ | 17 |
| Figure II.3 Réponse spectrale du photodétecteur BDJ | 18 |
| Figure II.4 Rapport des photos courants I_2/I_1 en fonction de λ | 18 |
| Figure II.5 Coefficient de réflexion en fonction de la longueur d'onde pour différentes épaisseurs d'oxyde de silicium | 19 |
| Figure II.6 Illustration du principe de photodétection dans la double jonction: a) Sous une lumière incidente de longueur d'onde inférieur à $\lambda < 500$ nm par rapport au ; b) cas d'une longueur d'onde $\lambda > 500$ nm | 20 |
| Figure II.7 Variation du coefficient d'absorption α du silicium intrinsèque en fonction de la longueur d'onde λ à 298 K | 21 |
| Figure II.8 Variation du courant photonique a) I_{ph1} et b) I_{ph2} en fonction de la longueur d'onde et de la polarisation inverse appliquée | 24 |
| Figure II.9 Illustration de la structure à triple jonction enterrée BTJ | 26 |
| Figure II.10 Principe de capture de l'information couleur dans a) une matrice CMOS couleur et b) une matrice de capteurs à trois jonctions enterrées | 27 |
| Figure III.1 Présentation de la structure à étudier | 29 |

| | |
|---|----|
| Figure III.2 Schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptre plan | 30 |
| Figure III.3 La variation de l'absorption en fonction de la longueur d'onde | 30 |
| Figure III.4 Schéma de principe d'un traitement antireflet | 32 |
| Figure III.5 La réflectance calculée pour un substrat de silicium revêtu ou non d'une couche antireflet de silice de 100nm d'épaisseur | 32 |
| Figure III.6 La réflectance pour le substrat de silicium revêtu par différentes couches minces | 33 |
| Figure III.7 Principe d'antireflet multicouche | 34 |
| Figure III.8 Empilement des trois couches minces Zro2, Sio2, MgF2 d'épaisseurs $\lambda_0/4$, $\lambda_0/2$, $\lambda_0/4$ respectivement | 35 |
| Figure III.9 Empilement des trois couches minces Zro2, CeF3, MgF2 d'épaisseurs $\lambda_0/4$, $\lambda_0/2$, $\lambda_0/4$ respectivement | 35 |
| Figure III.10 Empilement des trois couches minces Zro2, Sio2, MgF2 d'épaisseurs $\lambda_0/4$, $\lambda_0/2$, $\lambda_0/4$ respectivement | 36 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau I.1 Récapitulatif des principaux avantages et inconvénients de CMOS et CCD | 13 |
| Tableau III.1 Présentation de l'indice de réfraction et l'épaisseur des couches minces transparentes utilisées | 28 |
| Tableau III.2 : représentation de carré des indices de réfraction | 34 |

Introduction générale

Un capteur d'images est un instrument de détection et/ou d'observation destiné à produire, par un balayage bidimensionnel de l'espace observé, un signal électrique correspondant, point par point, à une scène observée.

A l'heure actuelle, deux grandes familles de capteurs numériques se distinguent : les capteurs CCD (Charge-Coupled Device) et les capteurs CMOS (Complementary Metal Oxyde Semiconductor). Ils utilisent tous deux le même matériau (le silicium), le même principe physique (l'effet photoélectrique), emploient des équipements optiques et électroniques comparables. Ces deux dispositifs ont en commun la génération, la collection et la mesure des charges électriques. Leurs différences se situent principalement au niveau de leur procédé de fabrication, de leur architecture et de leur manière d'acheminer le signal utile des différents pixels de l'imageur jusqu'en sortie, ce qui entraîne des caractéristiques propres à chacun.

Les capteurs CMOS sont des capteurs matriciels permettant d'enregistrer la totalité du plan image sans avoir recours à un balayage. L'architecture de lecture est directement présente dans le pixel, cela permet de contrôler la trame de lecture par un adressage aléatoire et de plus l'évolution des technologies permet d'intégrer les fonctions électroniques éliminant le bruit à sa source. Rajoutant à cela un coût, et une consommation plus faible, les CMOS ont supplanté les CCD dans le secteur concerné [1].

La partie photosensible du capteur, représentant le pixel, est pour certains capteurs un photoconducteur à jonctions. Dans notre étude, on a considéré, la photodiode à double jonctions [2].

L'objectif de notre travail a été alors l'étude des effets de la monocouche et du multicouche antireflet (CeF_3 , SiO_2 , MgF_2 et ZrO_2) sur les propriétés optiques du capteur à double jonctions. Pour cela nous avons fait une étude et une simulation de ce capteur sous COMSOL avec en premier lieu une seule couche mince ensuite on a juxtaposé plusieurs couches antireflets pour minimiser la réflexion de la lumière.

Le chapitre I se veut un état de l'art de ce domaine. Les principaux photodétecteurs du visible seront brièvement décrits, on définira les capteurs d'image intégrés sur silicium CCD et MOS et on montrera les avantages et inconvénients de chacun d'entre eux.

Dans le chapitre II, nous nous intéresserons à un photodétecteur à double jonction enterrée. Le principe de fonctionnement et les particularités de ce dispositif photosensible seront exposés. Le comportement des courants photoniques et d'obscurité circulant dans cette structure sera ensuite étudié.

Le chapitre III sera consacré à la simulation et aux résultats du capteur à double jonctions pour différentes couches antireflet (SiO_2 , ZrO_2 , MgF_2 et CeF_3) ainsi que pour un traitement antireflet multicouches.

Chapitre I

Généralités brèves sur la capture numérique de l'image sur silicium

I.1. Introduction :

Un capteur d'images est un instrument de détection et/ou d'observation destiné à produire, par un balayage bidimensionnel de l'espace observé, un signal électrique correspondant, point par point, à une scène observée.

Il existe deux types de capteurs d'images, les capteurs CCD (Charge-Coupled Device) et les capteurs CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) dits à pixels actifs APS [1]. Dans ce chapitre, on présentera d'abord les différents types des photodétecteurs. Puis on détaillera le fonctionnement des deux types de capteurs ainsi que les avantages et inconvénients de chacun d'eux.

I.2. Les détecteurs optiques intégrés sur silicium :

Les photodétecteurs sont des composants susceptibles de convertir des signaux lumineux en grandeurs électriques. De nombreux dispositifs mettent à profit ce phénomène physique de photodétection. En optoélectronique intégrée sur silicium, les plus employés sont les photoconducteurs, les photo-condensateurs, les photodiodes et les photo-transistors. C'est en fonction de l'application que le choix du détecteur le plus approprié est fait [1].

I.2.1. Le photoconducteur :

Le plus simple, par son principe physique, de ces capteurs optiques est le photoconducteur ou photo-résistance.

Il est basé sur la modulation optique de la conductivité d'un semiconducteur homogène. Celui-ci est constitué d'un barreau semiconducteur dopé N (ou P) ayant deux contacts ohmiques **Figure I.1** où est appliquée une différence de potentiel (formation d'un champ interne). Sous l'effet d'un rayonnement lumineux d'énergie suffisante $h\nu$, il y a une génération de porteurs à la surface et sur une faible profondeur des semi-conducteurs. La conductivité du matériau est alors accrue, ce qui conduit à une réduction de la résistance R du barreau telle que : $R = AE^{-a}$; avec E illumination incidente ; A et a deux paramètres technologiques dépendant du type de matériau utilisé.

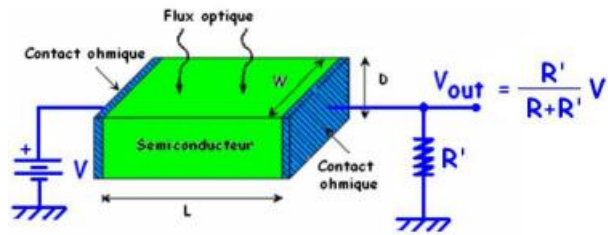


Figure I.1 : Principe de fonctionnement typique d'un photoconducteur, constitué d'un semi-conducteur dopé N.

Les dispositifs à photoconducteur se trouvent principalement dans des applications demandant de faibles fréquences de travail comme par exemple la thermométrie, la thermographie, etc.

I.2.2. Le photo-condensateur :

Constitué d'une plaque de conducteur transparent séparée d'un substrat semiconducteur par une fine couche d'oxyde de silicium **Figure I.2**, le photo- condensateur correspond à une capacité MOS (Métal- Oxyde-Semiconductor) d'où son nom usuel de photoMOS. Actuellement, on le retrouve principalement dans les matrices CCD et certaines matrices APS. Le principe de ce type de capteur se base sur une capacité MOS dont la grille est polarisée à une tension V positive ou supérieure à une tension de seuil V_{th} qui crée une zone de déplétion profonde. Similairement au transistor MOS à enrichissement, par le champ électrique induit, les trous sont refoulés dans le volume du substrat (ils partent alors à la masse) et les électrons sont alors attirés dans la région située sous la grille (interface Si/SiO₂), On parle de puits de potentiel.

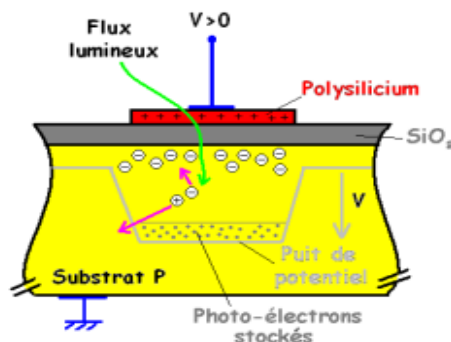


Figure I.2 : Illustration du principe d'accumulation de charges d'un photo-condensateur

I.2.3. Les photodétecteurs à jonction :

I.2.3.1 La photodiode :

Une photodiode est une simple jonction PN photo-réceptive (homojonction ou hétérojonction). Quelle que soit la tension appliquée à ces bornes, elle se compose de trois zones principales comme le montre la **Figure I.3**:

- deux zones quasi-neutres ;
- une zone de charge d'espace.

Lorsque les photons pénètrent dans le semiconducteur avec une énergie suffisante, ils peuvent créer là encore des photoporteurs. Chaque paire créée se traduit par la circulation dans le circuit extérieur d'un surplus de charges élémentaires. Mais, en raison de la forte quantité de porteurs majoritaires, seule l'augmentation du courant dû aux porteurs minoritaires est réellement observable. Dans la photodiode à jonction PN, les porteurs photo-générés à l'intérieur de la zone de déplétion située de part et d'autre de la jonction conduisent à un courant dit de transit (Drift). Dans les régions neutres, les porteurs minoritaires créés en excès se diffusent jusqu'à la limite de la zone de charge d'espace et s'ils atteignent cette limite (pas de recombinaison), ils contribuent au photocourant. Le courant photonique total sera la somme des deux courants de diffusion des zones N et P et d'un courant de transit.

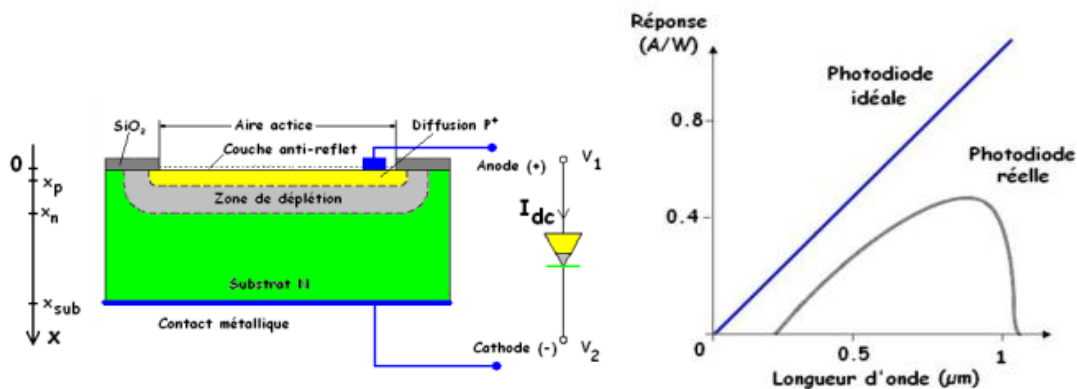


Figure I.3 : Coupe transversale et symbole d'une photodiode verticale P + /N (à gauche) et Réponse spectrale des photodiodes idéale et réelle (à droite).

I.2.3.2 La photodiode à avalanche :

Généralement, la photodiode est un composant dépourvu d'amplification interne. Cependant, sous une forte polarisation inverse, un phénomène de multiplication apparaît. On parle alors de photodiode à avalanche (APD, Avalanche PhotoDiode). En effet, sous un fort champ électrique interne, toutes les charges présentes dans la zone dépeuplée acquièrent une énergie cinétique importante et suffisante pour créer de nouveaux porteurs par collision ionisante avec le réseau cristallin. Ces paires secondaires nouvellement engendrées peuvent alors à leur tour générer de nouvelles paires de photo-porteurs. On assiste donc à une amplification par multiplication du nombre de porteurs traversant la région dépeuplée. Cette structure, est très adaptée pour les applications faible flux mais elle nécessite une forte tension d'alimentation et la stabilité en gain est assez médiocre.

I.2.3.3 La photodiode PIN :

Pour le concepteur, il est intéressant de disposer d'une photodiode ayant une zone de charge d'espace suffisamment grande pour que le photocourant soit essentiellement créé dans cette zone. La largeur de la zone de charge d'espace a été augmentée artificiellement en intercalant une région faiblement dopée, idéalement intrinsèque (quasi-isolant) entre les régions de type N et de type P **Figure I.4**. Ceci nous conduit à un autre type de structure nommée photodiode PIN (P Insulator N). Pour une polarisation inverse suffisante, cet élément réalise un champ constant à l'intérieur de la couche I. Si ce champ électrique est important, les photoporteurs atteignent très vite leur vitesse limite dans toute la zone intrinsèque. On obtient donc des photodiodes très rapides. De plus, le champ électrique dans la zone de déplétion empêche la recombinaison des porteurs, ce qui augmente la sensibilité de la photodiode. Un autre avantage de ce type de photodiode est sa grande capacité de collection des charges. Enfin, par sa zone dépeuplée enterrée, les effets de surface sont minimisés et le courant d'obscurité s'en trouve réduit. Les applications de la photodiode PIN sont nombreuses. Les photodiodes PIN sont principalement utilisées dans la détection rapide de signaux de faible amplitude, la photométrie, l'instrumentation, les lecteurs de code barre, la spectrophotométrie, les télécommunications optiques, etc.

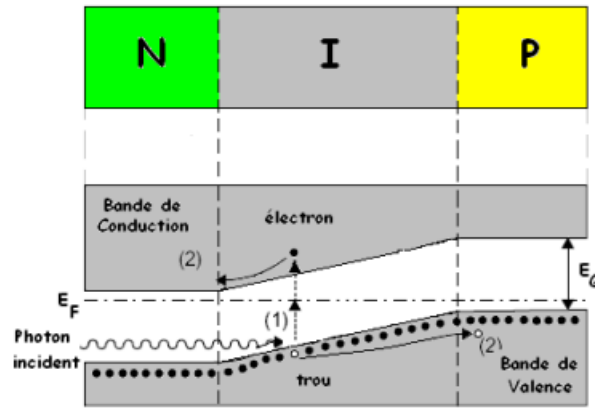


Figure I.4 : Vue en coupe d'une photodiode PIN.

I.2.3.4 Les photodiodes à jonctions enterrées :

S'appuyant sur une propriété optique jusqu'alors inexploitée du silicium, les photodétecteurs à multi-jonction PN suscitent depuis presque une décennie l'intérêt du monde des capteurs couleurs et plus globalement de l'imagerie numérique. En effet, ce matériau absorbe majoritairement chaque couleur (chaque longueur d'onde λ) à une profondeur x bien établie. Contrairement aux traditionnels photodétecteurs du visible qui utilisent des filtres optiques, pour récupérer l'information couleur, ces détecteurs utilisent plusieurs jonctions à des profondeurs différentes, ces capteurs multicouches présentent plusieurs niveaux superposés de photosites enterrés dans un substrat en silicium. Les différentes couches de photosites, constituées de jonctions PN en polarisation inverse (mode photoconducteur), sont positionnées verticalement de manière à enregistrer chacune une couleur différente. Connecté à une architecture de lecture, on récupère alors sur un même pixel plusieurs informations sur le flux lumineux incident avec des temps de réponse similaires à ceux des photodiodes classiques et une variation quasi-linéaire avec l'intensité d'un flux monochromatique arrivant sur la surface photo-sensible.

Avec les technologies CMOS et BiCMOS actuelles, l'implantation de deux à trois jonctions PN est possible.

- Le premier détecteur est constitué d'une double jonction enterrée [3]. Il permet de récupérer deux courants (ou tensions). Sa principale propriété est l'identification de la longueur d'onde d'un flux monochromatique (ou quasi-monochromatique) en plus de son intensité.

- Le second détecteur est constitué d'une triple jonction enterrée **Figure I.5**. Il est fabriqué en technologie BiCMOS [4]. Il permet principalement de délivrer trois réponses spectrales différentes, permettant de déterminer les trois composantes trichromatiques de la lumière incidente, ces deux capteurs vont l'objet de notre étude.

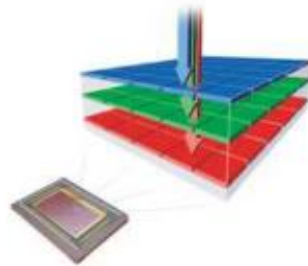


Figure I.5 : Illustration du capteur à triple jonction enterrée BTJ.

I.2.3.5 La photodiode Schottky :

La diode Schottky se définit comme l'association d'un substrat de type N ou P sur lequel est déposé une fine couche métallique (barrière Schottky). Sous un flux de photons incidents, à l'effet thermoionique se superpose le processus de photo-génération principalement localisé dans la zone de déplétion du semiconducteur. Lorsque le rayonnement crée des paires électron-trou dans cette zone de charge d'espace, la diode est le siège d'un photocourant de génération analogue à celui de la photodiode à jonction PN classique. Comme la zone de déplétion est proche du plan d'incidence, les photons de grande énergie (donc de courte longueur d'onde) peuvent y être absorbés. Les porteurs libres ainsi créés sont rapidement collectés par le champ électrique élevé. Ceci permet à ce genre de dispositif d'avoir une grande sensibilité dans le bleu et le violet et une réponse très rapide. De plus, par la faible épaisseur de sa couche métallique, des applications dans le domaine du proche ultra-violet sont tout aussi possibles. L'inconvénient d'une telle structure est sa mauvaise réponse aux grandes longueurs d'onde (rouge et infrarouge) liée à la grande réflectivité de la couche métallique (en or généralement) dans cette partie du spectre.

I.2.3.6 Le phototransistor :

Le phototransistor basé sur la structure bipolaire à base flottante (courant de base I_B nul) est le plus souvent rencontré. Ce dispositif peut être vu comme un système à jonction PN possédant une amplification interne comprise entre 100 et 600. Les paires électron-trou sont séparées dans la zone de charge d'espace de la jonction Base-Collecteur, donnant naissance à

un courant photonique. Comme la base est flottante, son potentiel est alors proportionnel à la concentration de porteurs majoritaires photo-générés dans cette base, ce qui provoque une modulation du courant de collecteur I_C par la lumière. Ce courant contribue au courant d'émetteur I_E avec un facteur d'amplification $h_{FE} = \beta$ (gain en courant émetteur commun) tel que : $I_E = (1 - \beta) I_{ph} + I_{C0} \approx \beta I_{ph}$

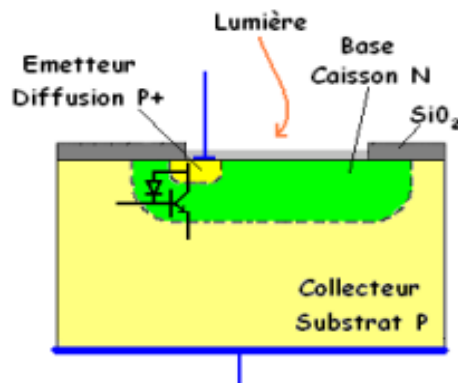


Figure I.6 : Coupe transversale d'un phototransistor bipolaire vertical.

Par son gain interne, cette structure est adaptée aux applications faible flux mais la réponse est non-linéaire et fortement dépendante de la température du composant. De plus, la sortie présente une impédance assez faible. D'autre part, la surface d'intégration est assez importante, ce qui conduit à un coût plus élevé que les photodiodes classiques et les temps de réponse sont légèrement supérieurs aux photodiodes (quelques 100 μs).

I.3 Les capteurs d'images intégrés sur silicium :

Dans cette partie, l'organisation et le fonctionnement des capteurs d'images intégrés sur silicium, soient les capteurs CCD et CMOS seront brièvement énoncés et on fera ressortir les avantages et inconvénients de chaque structure.

I.3.1 Capteurs CCD :

Le capteur CCD (Charge Coupled Device) correspond à un élément semi-conducteur pris en sandwich dans un condensateur électrique. Le principe de ce type de capteur est celui du photo-condensateur ou photoMOS. Dans ce type de photodétecteur, les charges générées par l'interaction avec la lumière sont accumulées sous la grille du photocondensateur, ces charges sont alors transférées de capacité en capacité puis vers un convertisseur de charge en tension

Figure I.7.

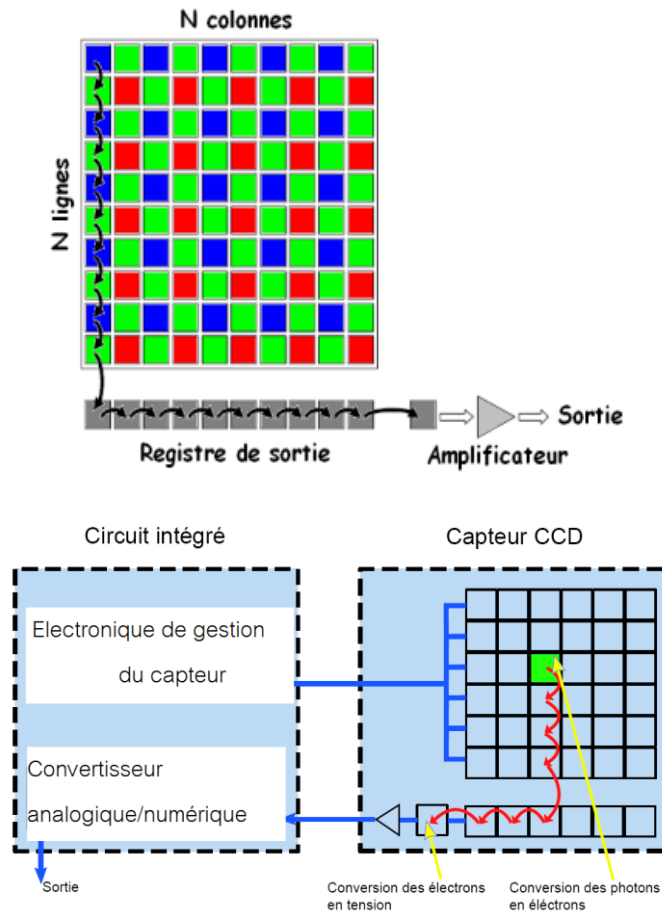


Figure I.7 : principe de fonctionnement des capteurs CCD.

I.3.2. Capteurs CMOS :

les CMOS eux ne sont réapparus que dans les années 90. Cela est dû grâce à leurs meilleures caractéristiques que les CCD au niveau du coût de fabrication ainsi que la consommation. Aujourd'hui, grâce aux grands progrès de la technologie de l'industrie et des semi-conducteurs alliant une grande possibilité d'intégration et d'excellente miniaturisation, les imageurs CMOS atteignent quasiment les performances des capteurs CCD [5].

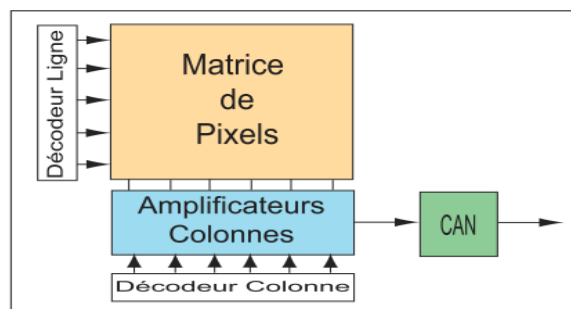


Figure I.8 : Disposition des différentes parties du capteur CMOS.

Les capteurs CMOS se composent d'un élément photosensible (photodiode) et d'éléments actifs (transistors MOS). Contrairement aux capteurs CCD, le transfert d'informations collectées par les photodiodes dans les capteurs CMOS se fait à travers un bus parcourant toute une colonne, qui est partagé par tous les pixels de la même colonne. Le fonctionnement est commandé par les deux décodeurs, ligne et colonne. Grâce au décodeur ligne on sélectionne une ligne de la matrice de pixel. Ensuite l'information de chaque pixel est envoyée à leur amplificateur colonne. Les informations reçues de chaque pixel dans l'amplificateur colonne sont échantillonnées et stockés dans ce dernier. Puis elles sont envoyés vers le convertisseur analogique numérique qui les transformera en un signal numérique soit de manière série (un CAN par circuit) soit de manière parallèle (un CAN par colonne). Une fois tous les pixels de la ligne traités, on passe à la ligne suivante et ainsi de suite jusqu'à avoir lu tous les pixels de la matrice.

I.3.3. Comparaisons entre les capteurs CCD et CMOS :

Par le rappel de quelques caractéristiques propres aux imageurs, cette partie se veut un résumé des principaux avantages et inconvénients des capteurs CMOS et CCD [1,5]:

- **Coût** : c'est le principal avantage des capteurs CMOS par rapport aux capteurs CCD, car les capteurs CCD ne peuvent pas être produits en technologie CMOS standard et sont donc fabriqués dans des centres de production dédiés.
- **Lecture des capteurs** : le transfert de charge dans un capteur CCD se fait de pixel à pixel comme montré auparavant dans la **Figure I.7** ce qui fige le mode de lecture. Contrairement aux capteurs CMOS où l'adressage est fait par l'activation d'une ligne et d'une colonne, augmentant ainsi la vitesse de lecture des capteurs CMOS et l'accès potentiellement libre aux pixels.
- **Facteur de remplissage** : le facteur de remplissage est le pourcentage de l'aire du pixel sensible à la lumière par rapport à la surface du pixel. Les capteurs CCD ont un facteur de remplissage proche de 100%. En revanche, dans les capteurs CMOS il reste autour de 50 à 70%, mais avec la diminution de la taille des transistors et l'utilisation de microlentilles, le facteur de remplissage dans les capteurs CMOS s'est beaucoup amélioré.
- **Bruit** : c'est le principal désavantage des capteurs CMOS par rapport aux capteurs CCD, car les capteurs APS présentent du bruit temporel et du bruit spatial fixe causés

par les amplificateurs dans la matrice de pixels et dans les circuits de lecture. Cependant, des techniques pour la diminution de bruit sont utilisées.

- **Consommation** : les capteurs CMOS sont polarisés à la tension d'alimentation de la technologie CMOS utilisée, ils consomment moins que les capteurs CCD qui ont besoin de valeurs de tension de l'ordre de la dizaine de volts pour réaliser le transfert de charges des pixels jusqu'au convertisseur analogique numérique.
- **Dynamique de fonctionnement** : la dynamique de fonctionnement dans les capteurs CMOS est de 60-70dB pour les capteurs standard et elle est de 120dB pour les capteurs logarithmiques. Par contre, pour les capteurs CCD la dynamique de fonctionnement est de l'ordre de 80-90dB.

| | | Critères | |
|----------|-------------|---|---|
| | | Principaux avantages | Principaux inconvénients |
| Capteurs | CMOS | <ul style="list-style-type: none"> - Possibilité d'adresser individuellement les pixels et de ne lire que certaines zones de la matrice - Compacité (électronique et capteur sur le même composant) - Faible consommation, autonomie - Coût (pour des applications courantes) | <ul style="list-style-type: none"> - Bruit - Peu sensible à faible luminosité |
| | CCD | <ul style="list-style-type: none"> - Qualité d'images élevée - Bruit très faible - Haute sensibilité | <ul style="list-style-type: none"> - Saturation du capteur aux fortes luminosités - Pas de possibilité de fenêtrage |

Tableau I.1 : Récapitulatif des principaux avantages et inconvénients de CMOS et CCD.

I.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents détecteurs optiques intégrés sur silicium.

Nous avons défini les deux types de capteurs d'images CCD et CMOS ainsi que le principe de fonctionnement de chacun d'eux. Nous avons alors présenté leurs avantages et inconvénients respectifs.

Nous allons maintenant, dans le chapitre suivant, nous concentrer sur les deux photodétecteurs à jonctions BDJ et BTJ, et pour notre simulation sous COMSOL on choisit le photocapteur à double jonctions enterrées **BDJ**.

Chapitre II

Le photocapteur BDJ et BTJ

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons rapporté deux, des dispositifs de détection de couleur à base de silicium, appelé structure à double jonction p-n (BDJ) et structure à triple jonction p-n (BTJ) qui sont mis en œuvre dans les processus IC standard. Ils peuvent être appliqués pour détecter les couleurs sans la nécessité d'utiliser des filtres optiques. Leur mise en œuvre en utilisant des technologies standards IC est particulièrement intéressante pour le développement de microsystèmes, car ils peuvent être intégrés de manière monolithique sur la même puce avec des circuits électroniques pour le traitement du signal, et aucun processus de fabrication spécifique supplémentaire n'est nécessaire.

II.2. Structure du capteur à double jonctions enterrées (buried double p-n jonction) BDJ :

La structure BDJ représenté sur la **Figure II.1** se compose de deux jonctions p-n enterrées à des profondeurs différentes (une diffusion P+, un caisson N et un substrat P), qui peuvent être conçus et fabriqués dans un processus CMOS standard. Cette structure permet de récupérer deux courants (ou tensions). Sa principale propriété est l'identification de la longueur d'onde d'un flux monochromatique (ou quasi-monochromatique) en plus de son intensité [3].

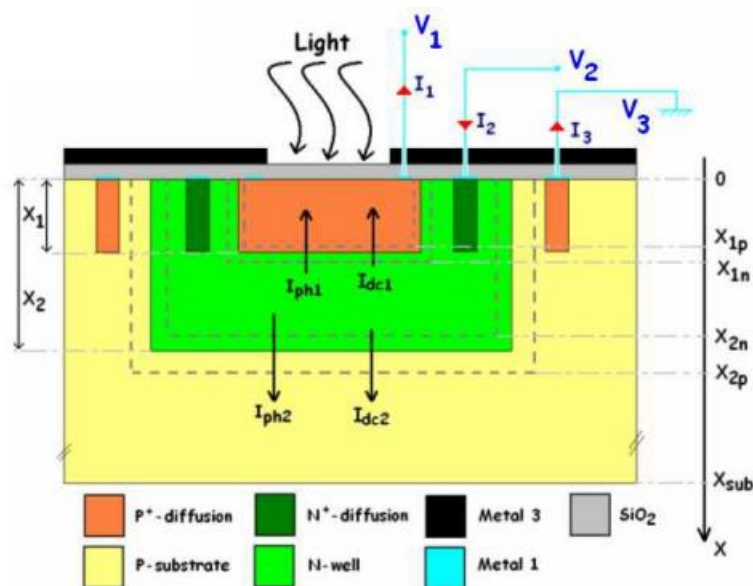


Figure II.1 : coupe transversale d'une structure BDJ implémenté dans un processus CMOS.

Comme le substrat est relié à la masse, deux courant I_1 et I_2 sont récupérés par l'intermédiaire de contacts ohmiques, placés sur la diffusion P + et le caisson N. Ces contacts forment une couronne métallique, servant à polariser uniformément chaque couche du dispositif et à diminuer la valeur des résistances séries. Cette couronne présente l'inconvénient de réduire le facteur de remplissage. On distinguera donc l'aire de chaque jonction J_1 et J_2 , respectivement A_{j1} et A_{j2} et la surface active A_j .

Une couche de métal 3 est aussi employée en surface en tant que masque optique afin de stopper toute pénétration de la radiation incidente en dehors de la surface active du capteur.

Le flux de photons incidents n'est alors supposé se propager que suivant un axe x ($\frac{d}{dx} \phi_t \neq 0$, $\frac{d}{dy} \phi_t = \frac{d}{dz} \phi_t = 0$, Où ϕ_t est le flux lumineux transmis au dispositif). Ce masque permet aussi de minimiser les effets de diaphonie, d'éblouissement entre des capteurs voisins et de réduire le calcul du photocourant à un problème à une dimension (effets de bord et courants photoniques latéraux négligés, en première approximation), etc.

Si l'on observe les trois zones quasi-neutres **Figure II.1** séparées par deux zones de déplétion, situées autour des interfaces P/N, on note que la profondeur de ces différentes couches est fonction des paramètres technologiques propres à chaque fondeur. Par conséquent, il nous est impossible d'optimiser la distance pour une longueur d'onde sans sortir du processus technologique standard. Mais, outre sa dépendance technologique (par les niveaux de dopage principalement), la largeur de chaque région est dépendante des tensions de polarisation appliquées. Pour une jonction abrupte, on exprime la largeur des deux régions dépeuplées W_{ZCE1} et W_{ZCE2} sous la forme:

$$W_{ZCE1} = x_{n1} - x_{p1} = W_{n1} + W_{p1} \quad \text{(II.1-a)}$$

$$W_{ZCE2} = x_{p2} - x_{n2} = W_{n2} + W_{p2} \quad \text{(II.1-b)}$$

Où; W_{n1} , W_{n2} largeurs des zones dépeuplées du côté où le silicium est dopé N [μm].

W_{p1} , W_{p2} largeurs des zones dépeuplées du côté où le silicium est dopé P [μm].

$$W_{n\theta} = W_{\theta} \frac{N_{a\theta}}{N_{a\theta} + N_d} \quad \text{(II.2-a)}$$

$$W_{p\theta} = W_{\theta} \frac{N_d}{N_{a\theta} + N_d} \quad \text{(II.2-b)}$$

$$W_{\theta} = \sqrt{2 \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{q} \left(\frac{1}{N_{a\theta}} + \frac{1}{N_d} (V_{bi\theta} - V_{app\theta}) \right)} \quad (\text{II.3})$$

Avec : $\theta = 1, 2$;

V_{app1} polarisation inverse appliquée à la jonction surfacique [V] ;

V_{app2} polarisation inverse appliquée à la jonction profonde [V] ;

N_{a1} concentration en accepteurs dans la diffusion P+ [cm^{-3}] ;

N_d concentration en donneurs dans le caisson N [cm^{-3}] ;

N_{a2} concentration en accepteurs dans le substrat P [cm^{-3}] ;

q charge élémentaire [$1.602 \cdot 10^{-19}$ C] ;

$\epsilon_0 \epsilon_r$ permittivité du silicium [$F \cdot cm^{-1}$] ;

V_{bi1} , V_{bi2} tension de diffusion de la jonction considérée, définie par :

$$V_{bi\theta} = KT \ln\left(\frac{N_d N_{a\theta}}{n_i^2}\right) \quad (\text{II.4})$$

k constante de Boltzmann [$1.34 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$] ;

T température [K] ;

n_i concentration intrinsèque [cm^{-3}].

Dans le cas d'une technologie CMOS 0.35 μm , la largeur de chaque zone de déplétion W_{ZCE1} ne dépasse pas 0.22 μm . Elle est principalement étendue du côté du caisson N. Pour la seconde zone dépeuplée, c'est dans le substrat que la déplétion W_{ZCE2} est la plus étendue. Elle est de l'ordre de 2 μm à $V_{app2} = 3.3$ V [1].

II.2.1. Principe de fonctionnement

Afin d'être en mode photoconducteur, chaque jonction doit être polarisée en inverse. Ainsi, considérant la figure 1.2, on a :

$$V_2 > V_1 > V_3$$

Où : V_1 : potentiel de la diffusion P+ [V] ;

V_2 : potentiel du caisson N [V] ;

V_3 : potentiel du substrat P [V] ;

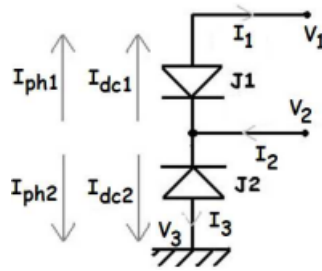


Figure II.2 : illustration simplifié du capteur **BDJ**.

Les deux jonctions se comportent comme deux photodiodes PN tête-bêche (J1 : diffusion P + sur caisson N et J2 : caisson N sur substrat P). Elles collectent séparément les porteurs photogénérés aux différentes profondeurs (fonctions du type de flux incident). Les deux courants traversant les jonctions sont alors tous les deux composés d'un courant photonique (I_{ph1} et I_{ph2}), dû au flux lumineux incident, auquel se superpose le courant d'obscurité (I_{dc1} et I_{dc2}), soient [3] :

$$I_1 = I_{ph1} + I_{dc1} \quad \text{(II.5)}$$

$$I_2 = I_{ph1} + I_{dc1} + I_{ph2} + I_{dc2} = I_1 + I_3 \quad \text{(II.6)}$$

Où : I_{ph1} , I_{ph2} : photocourant circulant dans chaque jonction [A] ;

I_{dc1} , I_{dc2} : courant d'obscurité traversant chaque jonction [A].

Les courants photoniques sont fortement dépendants de la longueur d'onde λ de la radiation incidente, par le coefficient d'absorption $\alpha(\lambda)$. Comme on peut le voir à travers la **Figure II.3**, une sélectivité spectrale naturelle s'opère au sein du cristal.

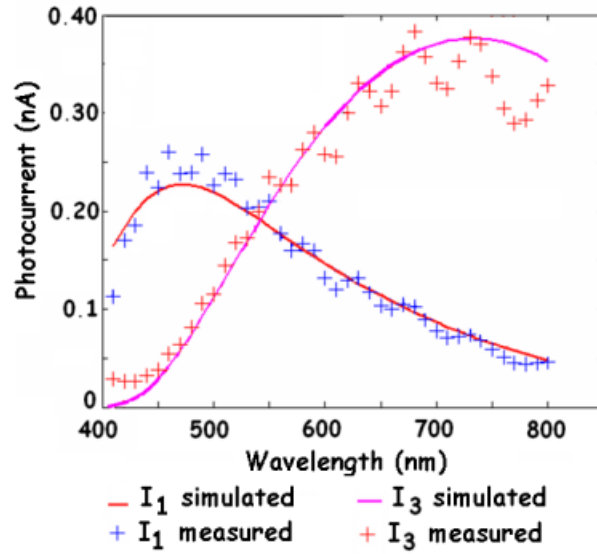


Figure II.3 : Réponse spectrale du photodétecteur **BDJ** [1,2].

Chaque réponse en courant se présente alors sous la forme d'un filtre passe-bande centré sur deux longueurs d'onde différentes du visible. Ainsi, les faibles longueurs d'onde, telle que le **bleu**, sont capturées près de la surface, tandis que les grandes longueurs d'onde, comme le **rouge**, induisent un photocourant majoritairement en profondeur. De plus, comme on peut le voir à travers la **figure II.4**, pour des photocourants supérieurs aux courants d'obscurité, le rapport des courants I_2 / I_1 se présente comme une fonction monotonique croissante avec la longueur d'onde [6].

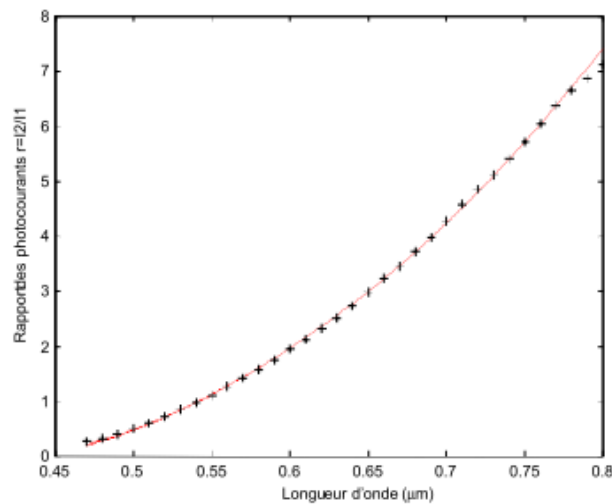


Figure II.4 : Rapport des photocourants I_2 / I_1 en fonction de λ .

II.2.2. Le coefficient de réflexion :

Conformément à la loi de Descartes, lors de la rencontre de la lumière et du semiconducteur, une partie du flux lumineux est réfléchi et l'autre partie est transmise :

$$\phi_t(\lambda) = (1-R(\lambda)) \phi(\lambda) \quad (\text{II.7})$$

Où ; $\phi(\lambda)$ est le flux de photons incidents.

$R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion.

En technologie CMOS, l'interaction lumière/silicium nécessite la considération d'au moins trois couches différentes (une couche d'oxyde de silicium sandwichée entre l'air et le semiconducteur). A chaque interface (air/SiO₂ et SiO₂ /Si) une partie du flux lumineux est réfléchi et une partie est transmise.

En effet, les technologies standard CMOS imposent la formation d'une couche d'oxyde de silicium en surface qui sert à la fois d'isolant pour le dépôt des couches métalliques et à la protection contre le milieu extérieur. Cette couche de passivation influence la répartition spectrale due à la radiation incidente. Dans cette couche d'oxyde de silicium, les réflexions induisent une variation sinusoïdale du courant photogénéré en fonction de la longueur d'onde du flux incident. Comme on peut le voir sur la **Figure II.5**, la période de cette sinusoïde est alors plus importante quand l'épaisseur d'oxyde de silicium e_{ox} augmente et la longueur d'onde λ diminue [3].

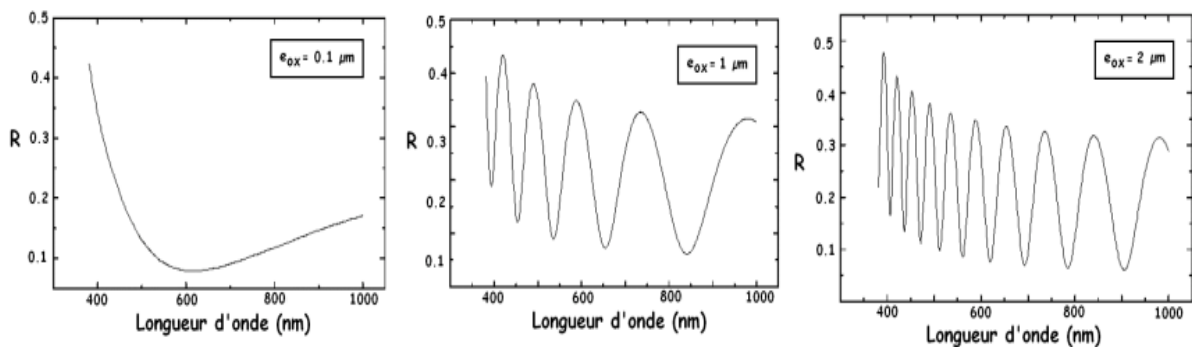


Figure II.5 : Coefficient de réflexion en fonction de la longueur d'onde pour différentes épaisseurs d'oxyde de silicium.

II.2.3. Taux de génération de paires électrons trous :

Quand une lumière incidente de longueur d'onde λ pénètre dans le silicium, elle est absorbée par le semiconducteur et des paires électron-trou sont générées. Le taux de paires électron-trou dépend de la longueur d'onde de la lumière incidente et de la profondeur de la jonction à partir de la surface du silicium [6] :

$$g(x, \lambda) = \Phi_t(\lambda) \alpha(\lambda) \exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (\text{II.7})$$

Etant donné qu'il comprend le coefficient d'absorption α , il dépend de la longueur d'onde. Pour une longueur d'onde donnée, le taux de production maximale est proportionnelle à la profondeur d'absorption, à savoir $x = \alpha^{-1}$. Ce résultat peut être obtenu mathématiquement à partir de l'équation (II.7). Quelques paires électron-trou sont alors statistiquement créées le long de son parcours mais la plupart des photoporteurs sont générés dans une région $\delta X\theta$ centrée sur une profondeur $X\theta$ comme l'illustre la **Figure II.6**. Pour la lumière **bleue**, cette profondeur est d'environ $0,2 \mu\text{m}$, et pour la lumière **rouge**, elle est d'environ $5 \mu\text{m}$ [3].

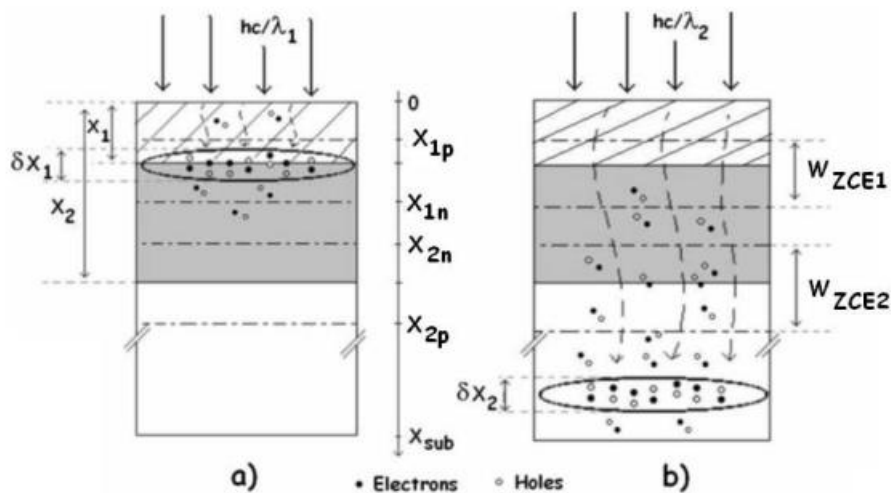


Figure II.6 : Illustration du principe de photodétection dans la double jonction: a) Sous une lumière incidente de longueur d'onde inférieure à $\lambda < 500 \text{ nm}$ par rapport au ; b) cas d'une longueur d'onde $\lambda > 500 \text{ nm}$.

Où $\alpha(\lambda)$ est le coefficient d'absorption du silicium, Bien que intensivement étudié, les modèles fiables de ce paramètre sont rares On peut cependant citer celui proposé par l'équipe du professeur J. Geist [7,18]. Basée sur des résultats expérimentaux, une

expression analytique du coefficient d'absorption α a été proposée. Cette équation paramétrique présente une erreur relative inférieure à dix pourcent à 298 K, pour des niveaux d'énergie compris entre 1.05 eV et 2.7 eV. Elle est de la forme :

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=-1}^1 (j \neq 0) \{C_{ji} [L(E - E_k + jdE_i)]^2\} + C_3 [2L(E - E_3)]^{N+dNE}}{E} \quad (\text{II.8})$$

Avec : $L(X) = (X + |X|)/2$ eV ;

$$C_{-11} = 5030.02 \text{ cm}^{-1} ; C_{11} = 483.916 \text{ cm}^{-1} ; C_{-12} = 1634.30 \text{ cm}^{-1} ;$$

$$C_{21} = 79.4079 \text{ cm}^{-1} ; C_3 = 1046.08 \text{ cm}^{-1} ;$$

$$E_k = 1.09969 \text{ eV} ; E_3 = 1.40985 \text{ eV} ;$$

$$dE_1 = 0.0583148 \text{ eV} ; dE_2 = 0.0220161 \text{ eV} ; N = 0.394122 ; dN = 1.23084 \text{ eV}^{-1}.$$

Dans la **Figure II.7** est représentée les variations du coefficient d'absorption du silicium en fonction de la longueur d'onde.

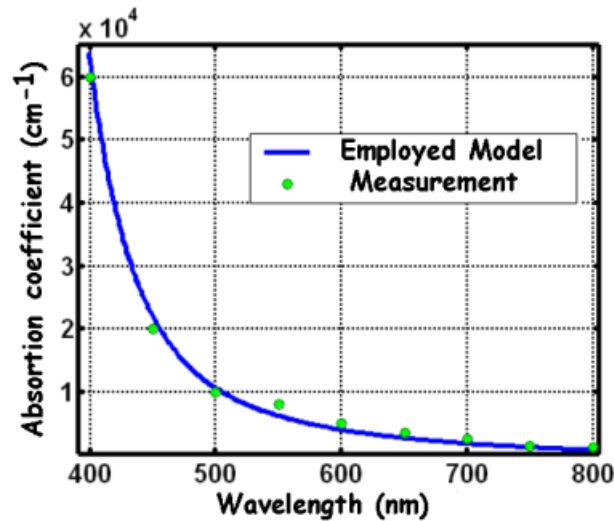


Figure II.7 : Variation du coefficient d'absorption α du silicium intrinsèque en fonction de la longueur d'onde λ à 298 K.

Outre sa forte dépendance avec la longueur d'onde, ce paramètre présente aussi une dépendance en température non négligeable.

$$\alpha(T) = \alpha(T_2) \left[\frac{\alpha(T_1)}{\alpha(T_2)} \right]^{\frac{T_2 - T}{T_2 - T_1}} \quad (\text{II.9})$$

II.2.4. Courant photonique et courant d'obscurité :

Afin de mettre en équation les courants traversant la structure étudiée en régime établi, on raisonne ici sur les concentrations de porteurs minoritaires. En effet, les variations de porteurs majoritaires produites par le flux lumineux incident sont négligeables par rapport à ces mêmes nombres de porteurs. Mais en ce qui concerne les porteurs minoritaires, ces variations sont perceptibles.

On sait, d'après la description précédente, que le photodétecteur est constitué de trois régions quasi-neutres et deux zones dépeuplées. Chacune de ces zones produit deux flux de particules. Ces courants n'ont pas la même origine, mais subissent des processus de transport quasi-similaires. L'un est un courant d'obscurité, l'autre est un photocourant.

II.2.4.1. Courant photonique :

Dans des conditions de polarisation inverse, chaque jonction recueille des charges photo-générées à l'intérieur et autour de sa région d'appauvrissement. Le photocourant résultant à travers la jonction a donc deux composantes: un courant de dérive et un courant de diffusion. La composante de dérive correspond aux charges collectées dans la couche d'épuisement, et la composante de diffusion à des résultats de charges collectées à partir des deux régions adjacentes quasi-neutres. Le processus de collecte à l'intérieur de la couche d'appauvrissement de la jonction est rapide et efficace: en raison du champ électrique interne, des trous et des électrons photo-générés sont rapidement séparés. Le courant de dérive peut donc être calculé par intégration du taux de production au-dessus de la couche d'appauvrissement:

$$I_{dr\theta} = qA_j \phi_t \exp(-\alpha W_\theta) \quad (\text{II.10})$$

Associée aux conditions aux limites, l'expression de la densité surfacique du photocourant, en un point x , est accessible par la résolution de la loi de la diffusion :

$$I_{phD} = qA_j D_p \left. \frac{\partial p_n}{\partial x} \right|_x \quad (\text{II.11})$$

Où :

$$I_{phD} = -qA_j D_n \left. \frac{\partial n_p}{\partial x} \right|_x \quad (\text{II.12})$$

Où D_p et D_n : sont les coefficients de diffusion pour les trous et les électrons respectivement ; p_n et n_p sont la concentration des porteurs minoritaires en excès dans la région quasi-neutre.

Chaque photocourant I_{ph1} et I_{ph2} est la somme de trois composantes : deux composantes de diffusion et une composante de transit Soient :

$$I_{ph1} = I_{phd11} + I_{phd12} + I_{dr1} \quad (\text{II.13})$$

$$I_{ph2} = I_{phd21} + I_{phd22} + I_{dr2} \quad (\text{II.14})$$

La **Figure II.8** montre un exemple des courants photoélectriques calculés I_{ph1} et I_{ph2} , pour une lumière incidente donnée. Leurs variations par rapport à la longueur d'onde représentent les réponses spectrales. Les paramètres correspondent à 20 μm x 20 μm détecteur **BDJ** conçu en technologie CMOS AMS 0.35 μm . Les effets de ces paramètres sur la réponse globale peuvent être évalués. Il en ressort à partir de la **Figure II.8**, que les tensions de polarisation n'ont pas une forte influence sur les courants photoélectriques.

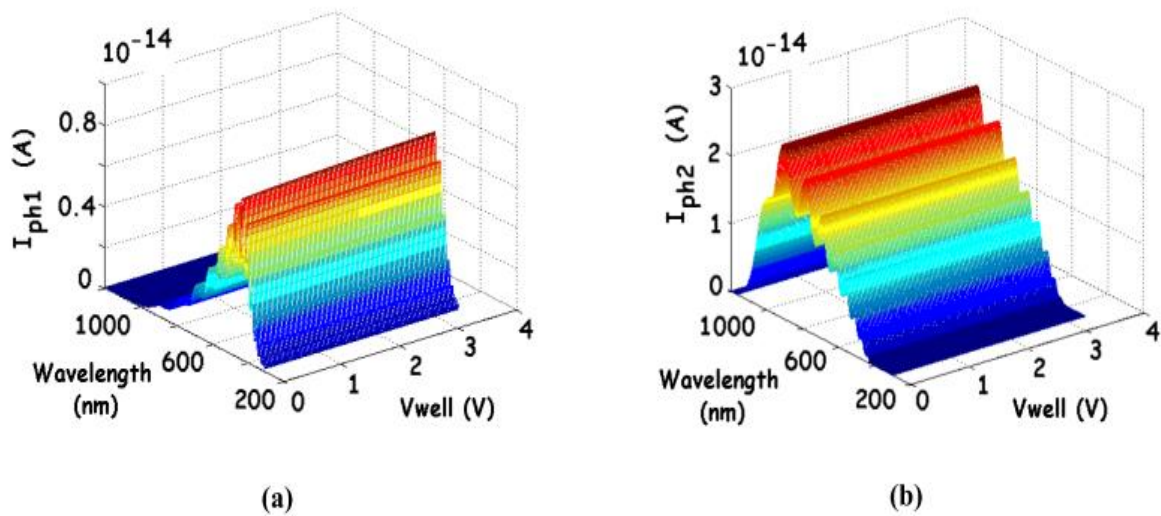


Figure II.8 : Variation du courant photonique a) I_{ph1} et b) I_{ph2} en fonction de la longueur d'onde et de la polarisation inverse appliquée.

II.2.4.2. Courant d'obscurité :

Sans éclairage, le courant de fuite circulant à travers une jonction PN polarisée en inverse est appelé courant d'obscurité (noté I_{dc}). Ce courant dépend des caractéristiques de la jonction et se superpose au photocourant à travers la jonction. Il place une limite sur la durée d'intégration pour mesurer la lumière d'intensité et il génère un bruit d'obscurité.

La valeur particulière du courant d'obscurité varie d'un échantillon à un échantillon et dépend de la température, de la qualité de fabrication, du niveau de dopage, de la tension de polarisation, et de la conception physique (mise en page), etc. Il est supposé être principalement attribuable aux porteurs générés thermiquement, mais il peut être sérieusement augmenté en raison de défauts du réseau de semi-conducteurs, des luxations et de la contamination par des impuretés indésirables. Le composant de diffusion peut devenir significatif à des températures élevées, alors que la contribution de la production thermique est liée à la largeur de la couche d'appauvrissement. Ces deux contributions peuvent être identifiées par leur faible dépendance à l'égard tension de polarisation, et leur forte dépendance à l'égard de la température.

Les deux courants d'obscurité du détecteur BDJ peuvent être exprimés sous forme de :

$$I_{dc1} = A_{j1}(J_{g1} + J_{d1} + J_{t1}) \quad \text{(II.15)}$$

$$I_{dc2} = A_{j2}(J_{g2} + J_{d2}) \quad \text{(II.16)}$$

Où A_{j1} , A_{j2} : aire de chaque jonction J_1 et J_2 respectivement; J_{g1} et J_{g2} (la contribution du processus de génération-recombinaison thermique, type SRH, de chaque jonction); J_{d1} et J_{d2} correspondent à la diffusion des densités de courant J_1 et J_2 ; J_{t1} (Effet tunnel).

II.3. Structure du capteur à triple jonctions enterrées (buried triple p-n junction) BTJ :

Une structure verticale **Figure II.9** à trois jonctions successives enterrées à des profondeurs croissantes, assemblées en paires et en opposition définissant quatre couches, l'une d'elles est adjacente à la partie photosensible. Cette structure est fabriquée en technologie BiCMOS. Elle permet principalement de délivrer trois réponses spectrales différentes, permettant de déterminer les trois composantes trichromatiques de la lumière incidente[4].

Les trois jonctions enterrées sont polarisées en inverse par trois tensions V1 et V2 et V3 ou :

$$0 < V2 < V1 \qquad 0 < V2 < V3$$

La génération des courants internes dans la structure produit des courants externes:

$$I_{1,2} = I_1 + I_2 \ ; \ I_{2,3} = I_2 + I_3$$

Les trois jonctions enterrées sont formées avec une couche de diffusion N de profondeur Xj_1 , dans un puits P de profondeur Xj_2 , sur un autre puits N de profondeur Xj_3 , le tout sur un substrat de type P. L'épaisseur de la couche de diffusion N^+ détermine la profondeur de la jonction de surface, le fond du puits N puis P détermine les profondeurs des jonctions les plus enterrées.

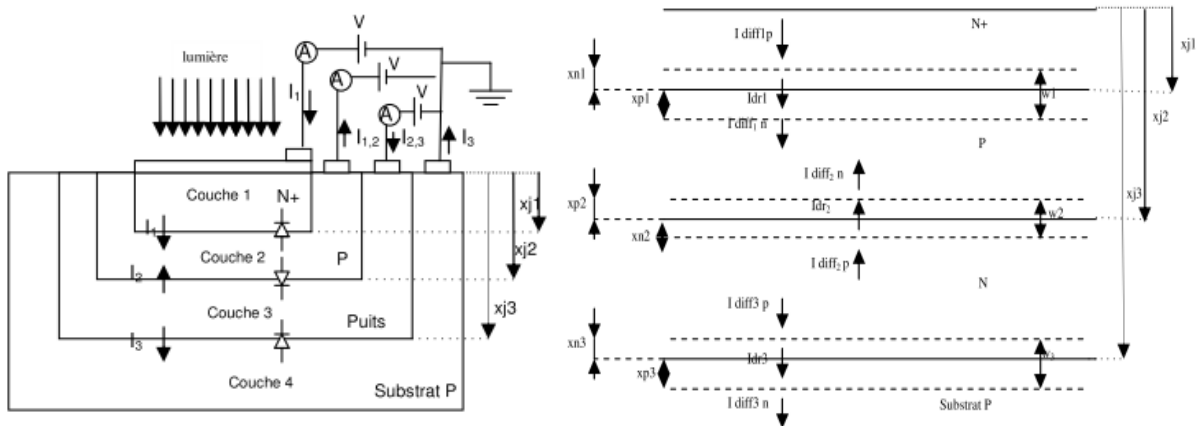


Figure II.9 : Illustration de la structure à triple jonctions enterrées BTJ.

La structure BTJ diffère de la structure BDJ par une jonction enterrée supplémentaire. L'approche de calcul des courants photoélectriques présentés dans le paragraphe précédent

peut être également adoptée pour déterminer les courants photoélectriques dans la structure BTJ [8].

Les avantages de ce capteur sont nombreux ; D'abord, le niveau des coûts de fabrication : comme les filtres colorés ne sont plus nécessaires et l'électronique de calcul est moins importante (puisque la couleur est directement obtenue sur le photosite et non plus après traitement électronique des couleurs de quatre photosites) [8]. Comme moins de calculs sont nécessaires, la disponibilité de l'appareil est accrue et des prises d'images type rafale sont alors possibles. D'autre part, comme il n'y a plus d'interpolation et de calculs pour déterminer la couleur réelle du pixel, la qualité de l'image est augmentée par rapport à celle d'un APS classique. De plus, toute la lumière est absorbée par la zone sensible, une partie de celle-ci n'est pas rejetée par un filtre (rouge, vert ou bleu).

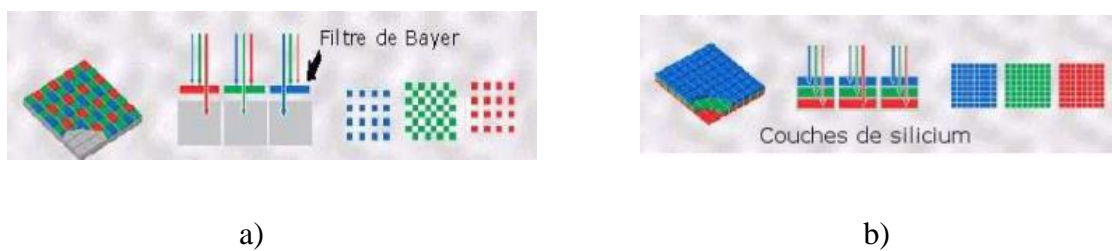


Figure II.10 : Principe de capture de l'information couleur dans a) une matrice CMOS couleur et b) une matrice de capteurs à trois jonctions enterrées.

II.4.Conclusion :

Ce chapitre est consacré à une brève explication de la structure du photodétecteur **BDJ** (et **BTJ**). L'avantage de cette structure est qu'elle n'utilise aucune modification technologique, à savoir pas de rajout de couche comme pour le filtre de Bayer. De plus, elle permet l'utilisation directe des courants pour reconstruire les couleurs par le traitement.

Chapitre III

Optimisation du capteur BDJ et résultats

III.1 Introduction :

Notre travail porte sur la modélisation et la simulation d'un capteur BDJ sous le logiciel COMSOL dont le but est l'optimisation des performances du photodétecteur pour un meilleur rendement, voire une meilleure exploitation de l'information donc, il est nécessaire de tenter de diminuer autant que possible la réflexion de la couche antireflet.

Dans ce chapitre, nous allons simuler le modèle du capteur pour différentes couches diélectriques (SiO_2 , ZrO_2 , MgF_2 et CeF_3) pour un traitement antireflet mono et multicouches.

III.2 La structure utilisée :

La structure utilisée est celle du capteur à double jonction BDJ de type silicium cristallin revêtu d'une couche antireflet de Silice pour protéger le capteur. Notre travail consiste à déposer un assemblage lamellaire de matériaux diélectriques en surface **Tableau III.1** et faire une étude sur la variation de la réflectance dans le but de diminuer la part de lumière réfléchie et donc augmenter la part de lumière transmise, ensuite on empile plusieurs couches les unes sur les autres pour réduire les reflets sur toutes les longueurs d'ondes.

| matériaux | Indice de réfraction (n) | Epaisseur (nm) |
|--|-----------------------------|----------------|
| Dioxyde de Silicium (SiO_2) | 1.45 | 90 |
| Fluorure de Magnésium (MgF_2) | 1.38 | 100 |
| Fluorure de Cérium (CeF_3) | 1.63 | 80 |
| Dioxyde de Zirconium (ZrO_2) | 2.2 | 60 |

Tableau III.1 : Présentation de l'indice de réfraction et l'épaisseur des couches minces transparentes utilisées.

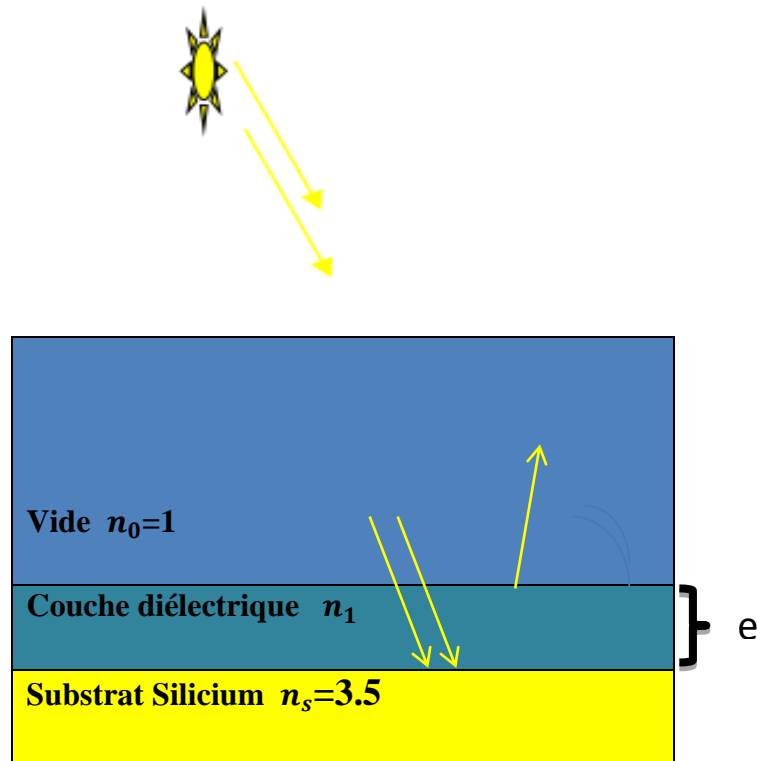


Figure III.1 : Présentation de la structure à étudier.

III.3 Les propriétés optiques :

III.3.1 L'indice de réfraction :

L'indice de réfraction d'un matériau est défini par le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide, c , sur la vitesse de la lumière dans le matériau, v , par [11]:

$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{III.1})$$

Il intervient également dans la détermination des coefficients de réflexion et de transmission à travers la relation de Snell-Descartes :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (\text{III.2})$$

Avec :

- n_1 et n_2 : Les indices de réfractons de deux milieux.
- θ_1 et θ_2 : Les angles des rayons lumineux par rapport à la normale.

La **Figure III.2** représente les chemins optiques au niveau d'un dioptre plan. Le rayon incident arrive sur le dioptre avec un angle θ_1 par rapport à la normale. Une partie du rayon est réfléchiée avec le même angle, appelé θ_1' , l'autre partie du rayon est transmise avec un angle θ_2 par rapport à la normale. Dans cet exemple, on a pris $n_1 < n_2$, donc $\theta_1 > \theta_2$.

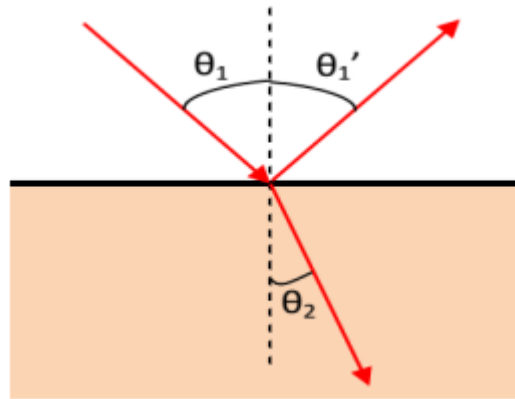


Figure III.2 : Schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptre plan.

III.3.2 Le coefficient d'absorption :

Le coefficient d'absorption α (ou taux de décroissance de la lumière le long de son parcours) représente la fraction du flux lumineux Φ qui sera absorbée par un matériau quelconque par unité de profondeur x , Soit : $\alpha = \frac{\text{flux incident}}{\text{flux absorbé}}$. Exprimé usuellement en cm^{-1} , on le définit couramment à partir de la densité du rayonnement par unité de longueur.

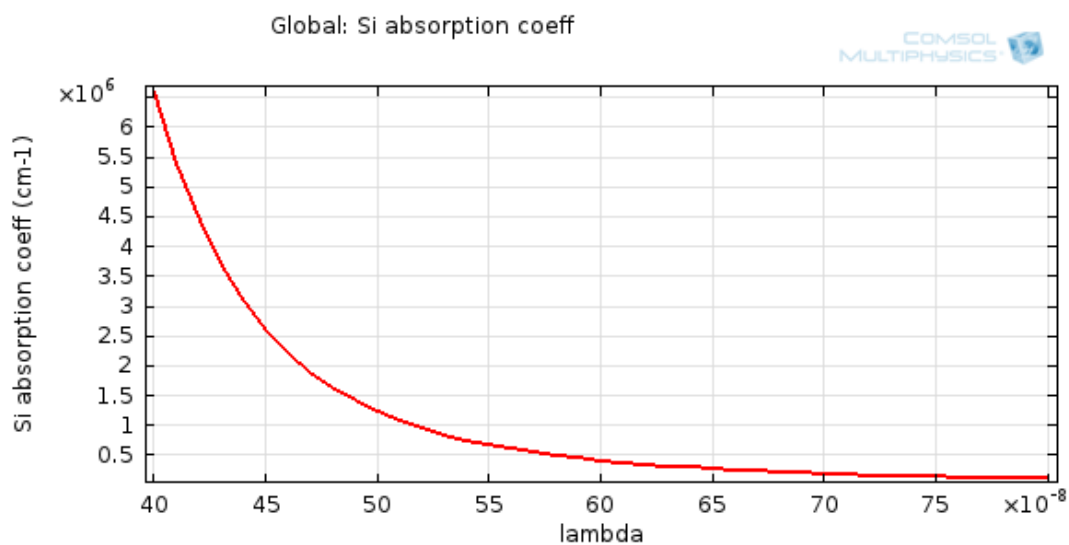


Figure III.3 : La variation de l'absorption en fonction de la longueur d'onde.

III.3.3 La réflectance :

La réflectance dépend de la longueur d'onde incidente [12], ainsi son expression expérimentale est modélisée pour les deux polarisations par l'expression suivante :

$$R_p = \left| \frac{E_r}{E_i} \right|_p^2 \quad R_s = \left| \frac{E_r}{E_i} \right|_s^2 \quad (\text{III.3})$$

$$R(\lambda) = \frac{R_p(\lambda) + R_s(\lambda)}{2} \quad (\text{III.4})$$

III.4 Le traitement antireflet :

La quantité de photons pénétrant le capteur dépend de la réflectivité de sa surface. La réflectivité caractérise la quantité de photons réfléchi par la surface, soit une perte du rayonnement incident. Pour minimiser la réflexion de la lumière en surface, cette dernière est recouverte d'une couche anti-réfléchissante (Anti-Reflective Coatings **CAR**). Le rôle de la couche anti-réfléchissante est de réduire la réflectivité du capteur [11].

Le traitement antireflet le plus simple consiste à ajouter sur la surface d'un matériau massif d'indice de réfraction n_s une couche mince transparente d'indice n_1 (avec $n_1 < n_s$) dont l'épaisseur va permettre de déphaser l'onde de 180° ($\Delta\phi = 4\pi n_1(\lambda_0) e / \lambda_0 = \pi$) lors de la propagation aller-retour dans la couche mince **Figure III.4**. On obtient alors, pour la longueur d'onde λ_0 à laquelle cette condition est réalisée, une extinction parfaite si l'indice de la couche mince est choisi de manière à équilibrer l'amplitude des réflexions aux deux interfaces. La première condition, sur l'épaisseur de la couche, s'écrit [13] :

$$n_1(\lambda_0) e = \lambda_0 / 4 \Rightarrow e = \lambda_0 / 4 n_1(\lambda_0) \quad (\text{III.5})$$

La seconde condition sur l'indice s'écrit :

$$n_1(\lambda_0)^2 = n_0 n_s = n_s \quad (\text{III.6})$$

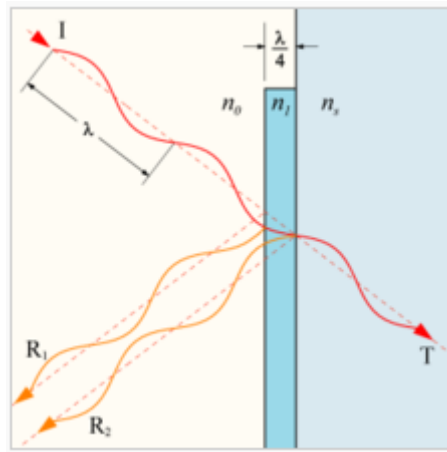
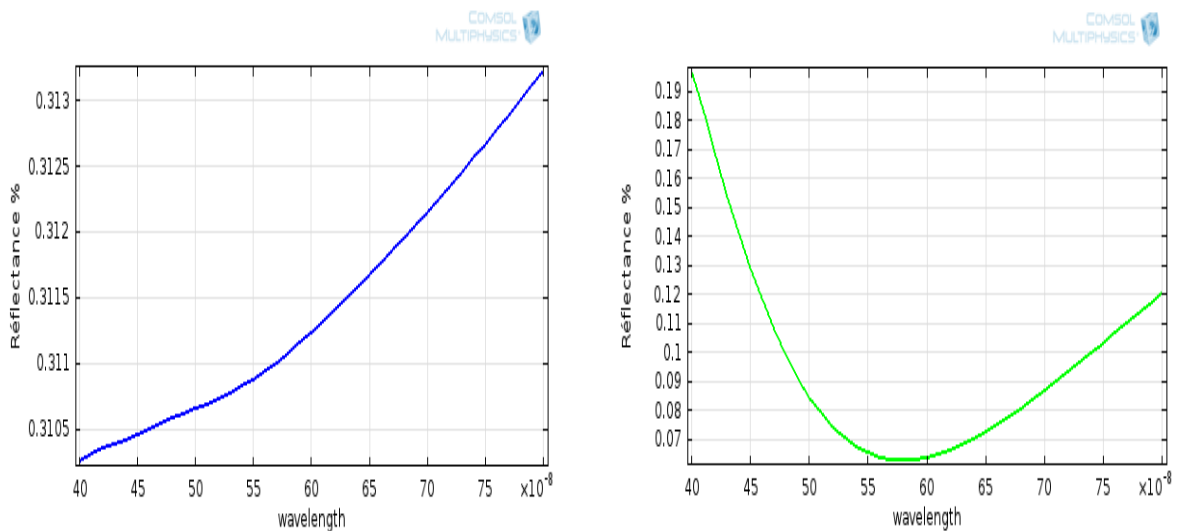


Figure III.4 : Schéma de principe d'un traitement antireflet [14].

Nous avons tracé sur la **Figure III.5** le spectre de réflexion d'un substrat silicium recouvert ou non d'une couche antireflet de silice d'épaisseur 100 nm et d'indice 1.45 dans le domaine du visible, à $\lambda_0 = 550$ nm on obtient bien une réflectance nulle. Cette couche permet en fait de diminuer notablement la réflectivité du substrat nu sur tout le domaine du visible. Sur la plage 500 nm – 650 nm.



a) Sans antireflet

b) Avec antireflet

Figure III.5 : La réflectance calculée pour un substrat de silicium revêtu ou non d'une couche antireflet de silice de 100nm d'épaisseur.

D'après les figures ci-dessus, la réflectance d'un substrat de silicium est élevée (il y'a des pertes du flux lumineux incident) et elle augmente par l'augmentation de longueur d'onde. Un

revêtement antireflet d'une couche de silice SiO₂ peut réduire la perte de transmission (la réflectance) à 6%.

La réduction de la réflexion de la lumière se fait en jouant sur les indices de réfraction des matériaux traversés. Nous avons simulé la réflectance en fonction de la longueur d'onde du photon et des indices de réfraction (différents matériaux diélectriques) **Figure III.6**:

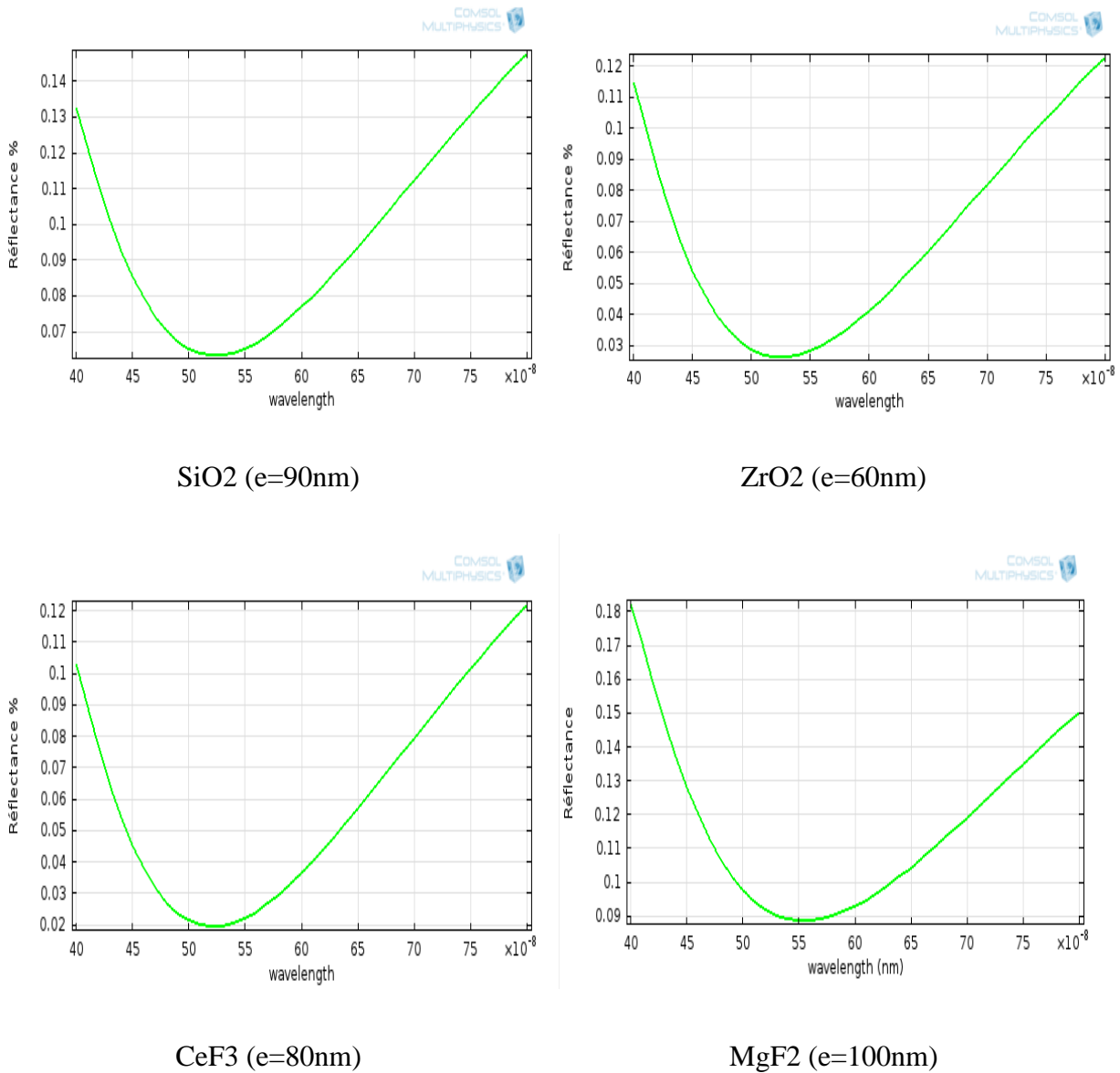


Figure III.6 : La réflectance pour le substrat de silicium revêtu par différentes couches minces.

Pour la seconde condition sur l'indice de réfraction de la couche diélectrique on a :

$$n_1 (550)^2 = n_0 n_s = n_s = 3.5 \quad (n_0 = 1 \text{ :vide ; } n_s = 3,5 \text{ :silicium})$$

| matériaux | $n_1(550)^2$ | La réflectance % |
|---|--------------|------------------|
| Dioxyde de Silicium (SiO ₂) | 2.25 | 6 |
| Fluorure de Magnésium (MgF ₂) | 1.9 | 9 |
| Fluorure de Cérium (CeF ₃) | 2.65 | 2 |
| Dioxyde de Zirconium (ZrO ₂) | 4.84 | 2.5 |

Tableau III.2 : Représentation de carré des indices de réfraction.

La valeur la plus proche de n_s c'est celle du fluorure de cérium (CeF₃), donc l'indice de cette couche mince est le plus efficace de manière à équilibrer l'amplitude des réflexions aux deux interfaces (vide et silicium), voire une meilleure exploitation de l'information.

L'antireflet monocouche présentée ci-dessus a des performances calculées pour une seule longueur d'onde (550nm). En conséquence la réflexion est plus élevée pour les autres longueurs d'onde du spectre visible. Il en résulte un léger reflet de couleur pourpre (mélange de violet et rouge). Ce type d'antireflet est communément appelé couche quart d'onde car son épaisseur optique (indice de réfraction multiplié par l'épaisseur) est égale au quart de la longueur d'onde à laquelle l'annulation de la réflexion a été calculée. Ceci représente un des blocs élémentaires de tout filtre optique car il permet de créer des interférences destructives [15].

Le principe d'obtenir, par un écart d'indice de réfraction, des interférences destructives a été étendu à un empilement de couches. Ainsi en superposant plusieurs couches, d'épaisseur et d'indice différents, il est possible de diminuer la réflectivité sur une plus large gamme spectrale.

III.5 Antireflets multicouches :

Par son principe, une seule couche ne permet de supprimer parfaitement qu'une seule longueur d'onde (une seule couleur de reflets) plus on s'éloigne de cette couleur centrale, moins l'antireflet est efficace. Pour réduire les reflets sur toutes les longueurs d'ondes, on empile plusieurs couches les unes sur les autres. Comme il n'est pas possible de trouver des couches d'indice de plus en plus faible (pour obtenir la condition : $n_1 < n_s$), on alterne les couches super réfléchissantes (avec un indice plus élevé) avec les couches antireflets.

Avec un antireflets multicouches, on peut obtenir jusqu'à 99.9% de transmission [16].

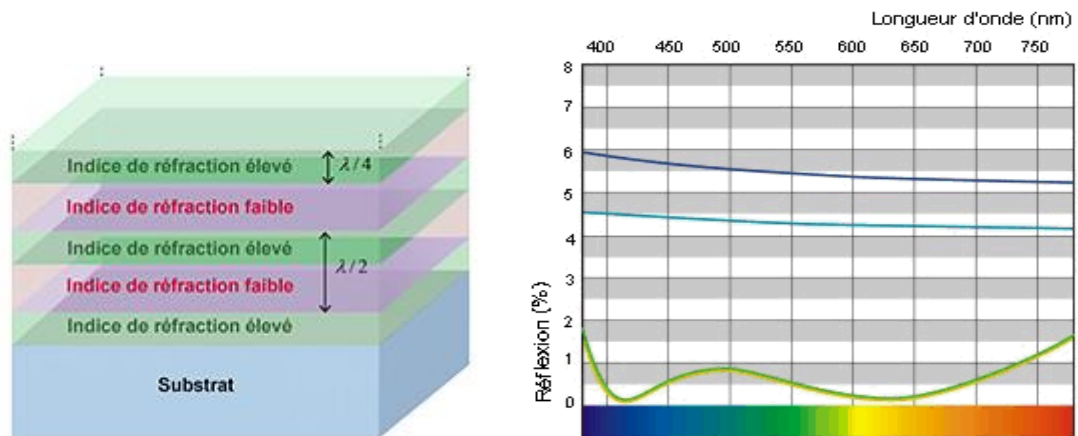


Figure III.7 : Principe d'antireflet multicouche [16].

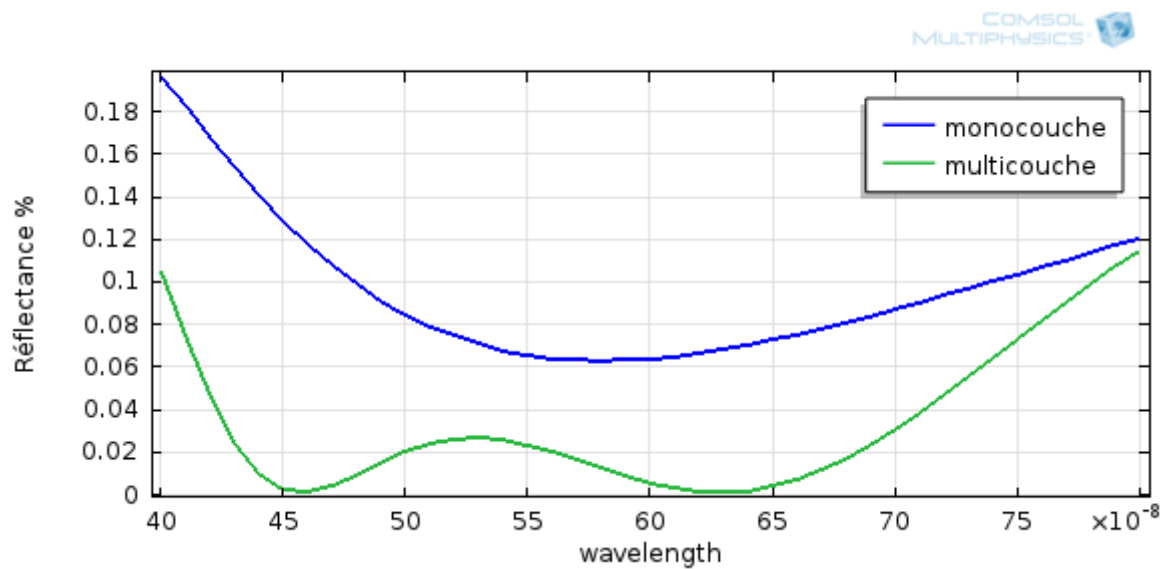


Figure III.8 : Coefficient de réflexion calculé pour un empilement de trois couches minces Zro2, Sio2, MgF2 d'épaisseurs $\lambda_0/4$, $\lambda_0/2$, $\lambda_0/4$ respectivement.

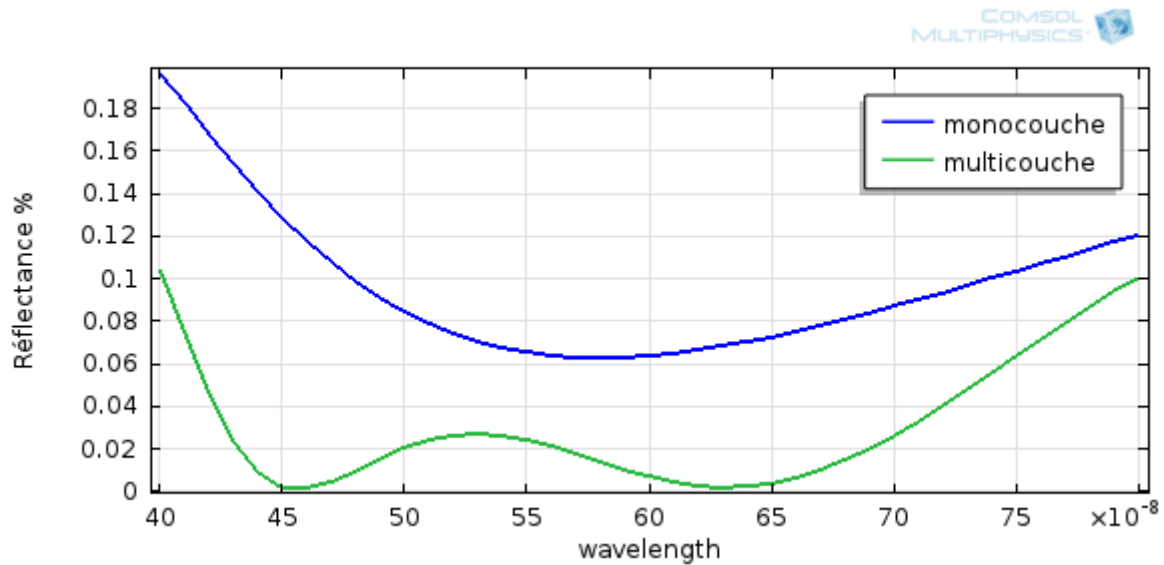


Figure III.9 : Coefficient de réflexion calculé pour un empilement de trois couches minces Zro2, CeF3, MgF2 d'épaisseurs $\lambda_0/4$, $\lambda_0/2$, $\lambda_0/4$ respectivement.

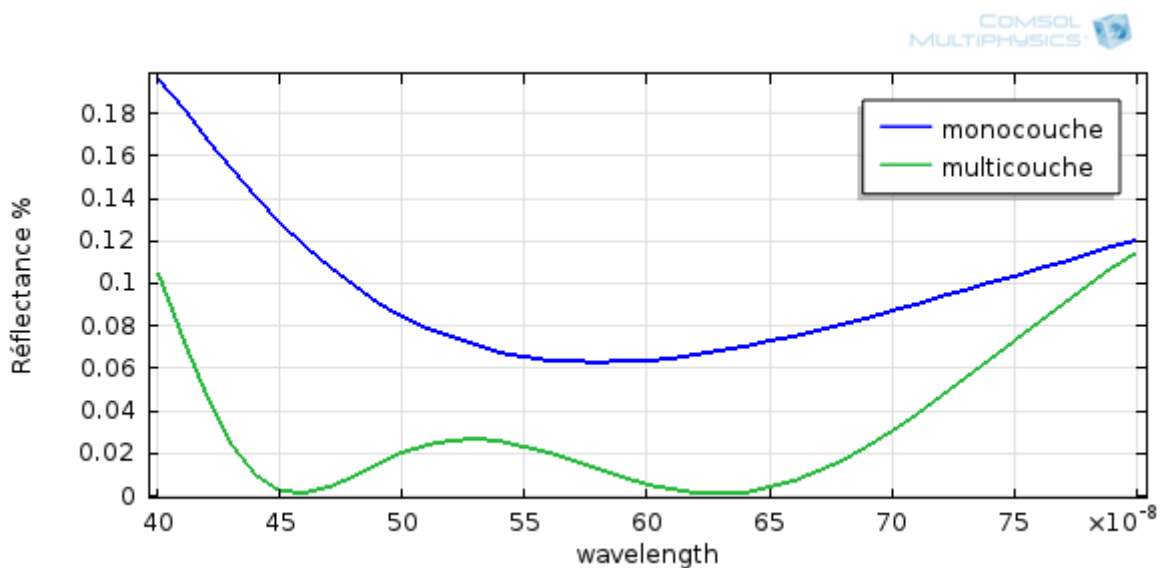


Figure III.10 : Coefficient de réflexion calculé pour un empilement de trois couches minces Zro2, SiO2, MgF2 d'épaisseurs $\lambda_0/4$, $\lambda_0/2$, $\lambda_0/4$ respectivement.

Les résultats sous COMSOL montrent que l'utilisation de plusieurs couches minces optimise le taux de transmission où il élargit l'effet vers l'ultraviolet et l'infrarouge et réduire la réflectance en-dessous de 0.5%, donc ces résultats sont en parfait accord avec les résultats des références [16,17].

III.6 Résultat des courants du BDJ :

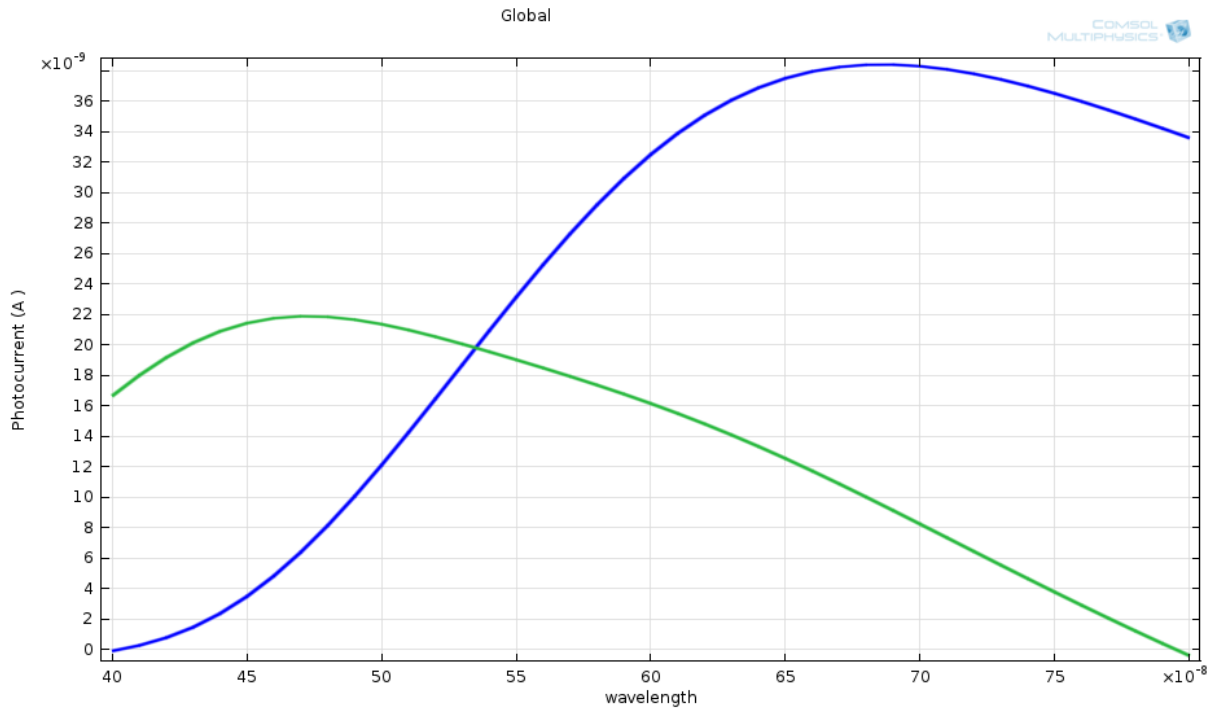


Figure III.11 : Réponse spectrale des deux jonctions du photocapteur BDJ.

Les deux réponses en courants du BDJ pour une structure antireflet multicouche ont bien validées. Chaque réponse en courant se présente alors sous la forme d'un filtre passe-bande centré sur deux longueurs d'onde différentes du visible, une réponse centré sur la longueur d'onde 475 nm pour le **bleu** et une réponse centré sur la longueur d'onde 575 nm pour le **rouge**.

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence du traitement antireflet monocouche et multicouche pour différents diélectriques, sur la réflexion et ce appliqué au photocapteur à double jonction BDJ. Le but de cette étude est l'optimisation de la structure pour de meilleures performances.

Après simulation sous COMSOL, nous avons trouvé que le traitement anti reflet simple, monocouche, permet néanmoins de réduire le coefficient de réflexion à une valeur de l'ordre du pourcent, mais au centre du spectre du visible seulement, alors que les traitements multicouches réduisent le coefficient de réflexion sur toutes les longueurs d'ondes du spectre du visible.

Conclusion générale

Les travaux de ce mémoire portent sur l'étude et la simulation sous COMSOL de microstructures antireflet, mono et multicouches pour un photocapteur à double jonctions BDJ.

Avant de conclure sur les résultats de l'ensemble de nos travaux, nous proposons de dresser un rapide bilan.

Une vue d'ensemble sur la lumière et les capteurs optiques a été passée en revue. Les capteurs CMOS et CCD ont été présentés avec une comparaison de leurs caractéristiques principales, leur coût de réalisation, leur faible consommation, et leur intégration et miniaturisation (moins encombrant).

Nous avons illustré un photodétecteur à double jonction enterrée, ce transducteur souffre de la présence du bruit, qui réduit ses performances mais la structure à double jonction enterrée dans un semi-conducteur permet la détection de la couleur d'un flux lumineux monochromatique (identification de la longueur d'onde).

Au cours de ce travail, nous avons vu que le traitement anti reflet simple, monocouche, permet néanmoins avec le matériau CeF_3 de réduire le coefficient de réflexion à une valeur de l'ordre du pourcent (vers 2%), mais au centre du spectre visible seulement, alors que les traitements multicouches (trois couches minces diélectriques dans notre cas) réduisent le coefficient de réflexion en-dessous de 0,5% sur toute la gamme des longueurs d'ondes du spectre visible.

Nous avons pu confronter nos résultats à ceux trouvés dans la littérature [16,17], ainsi nous avons pu les valider.

Le traitement multicouches peut aller au-delà de trois couches et ce pour des applications spécifiques. En effet, la juxtaposition adéquate des couches minces diélectriques, réduit considérablement le coefficient de réflexion.

Bibliographie

- [1] Sylvain FERUGLIO «**Etude du bruit dans les capteurs d'images intégrés, type APS**», thèse de DOCTORAT, institut Electronique, Electrotechnique, Automatique et Applications de la physique, 2005.
- [2] G.N. Lu, M. Ben Chouikha, G. Sou and M. Sedjil, "**Color detection using a buried double p-n junction structure implemented in the CMOS process**," Electronics Letters, Vol. 32, No. 6, pp.594-596, 1996.
- [3] Sylvain Feruglio, Guo-Neng Lu, Patrick Garda and Gabriel Vasilescu, Review : "**A Review of the CMOS Buried Double Junction (BDJ) Photodetector and its Applications**," Sensors, Vol. 8, N.10, pp.6566-6594, 2008.
- [4] M. Ben Chouikha, G. N. Lu, M. Sedjil, G. Sou and G. Alquié, "**Buried Triple p-n Junction Structure in a BiCMOS Technology for Color Detection**" IEEE BCTM, pp.108-111, Minneapolis (USA), 1997.
- [5] Hakim ZIMOUCHE «Capteur d'images CMOS à réponse insensible aux variations de température», thèse de DOCTORAT, institut Électronique, Électrotechnique, Automatique et Traitement du Signal, 2011.
- [6] A.Alexandre, M.BenChouikha, M.Sedjil, G.Alqui, "**An improved BDJ photodetector physical model implemented under SPICE**" Proc. MSM, San Diego, CA, Ch. 5, pp. 189-192, 2000.
- [7] Geist, J.; Migdall, A.; Baites, H.-P. "Analytic Representation of the Silicon Absorption Coefficient in the Indirect Transition Region". Appl. Optics, Vol. 27, pp. 3777-3779, 1988
- [8] M. Sedjil, G. N. Lu, M. Ben Chouikha and A. Alexandre, "**Modeling of BDJ and BTJ structures for color detection**" SPIE, Vol. 3680, pp.388-397, 1999.

[9] M. Ben Chouikha, M.B.; Lu, G.N.; Sedjil, M.; G.Sou, "**Colour detection using a buried triple p-n junction structure implemented in a BiCMOS process**", Electron. Lett., Vol. 34, No. 1, pp. 120-122, 1998.

[10] http://fr.wikiversity.org/wiki/capteur/capteurs_optiques

[11] Yacine MAAROUF: «Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco.», Mémoire de MAGISTÈRE, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.

[12] <http://fr.wikipedia.org/wiki/réflexion>, **Réflectance**.

[13] F. Delmotte (2010). **Couches minces et optiques multicouches dans le domaine spectral XUV (1 nm à 60 nm)**.

[14] <http://fr.wikipedia.org/wiki/antireflet>, **Traitement antireflet**.

[15] Emmett E. Perl, William E. McMahon, John E. Bowers, and Daniel J. Friedman, "**Design of antireflective nanostructures and optical coatings for next-generation multijunction photovoltaic devices**", OSA., Vol. 22, No. S5, pp. 1243-1256, 2014.

[16] <http://www.astrosurf.com/luxorion/faq-lombry-fr>

[17] S. I. Park and Y. J. Lee, "**Design of Multilayer Antireflection Coatings**", Journal of the Korean Physical Society, Vol. 32, No. 5, pp. 676-680, 1998.

[18] Rellam Wahid: «Modélisation d'un photocapteur BTJ.», Mémoire de Master en microélectronique, Microsystèmes et Conception de Circuits, MMCC, Université Saad Dahlab de Blida, 2013.