UNIVERSITE DE M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE MASTRE

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

OPTION : MICRO-ELECTRONIQUE

Thème

Amélioration de l'absorption dans les cristaux photoniques 2D : Application aux cellules solaires photovoltaïques

Présenté par :

CHENDI Rogiya

Encadré par :

Dr. HOCINI Abdesselam

Mr. BOURAS Mounir

Promotion : JUIN 2015

Remerciements

Je remercie mon DIEU.

Dr .HOCINI Abdesselam, M. BOURAS Mounir et OUANOUGHI Asma. Pour le tout.

Ma mère puis mon père.

Et enfin, mes remerciements à ma familles et amis

pour leur soutien moral.

CHENDI Rogiya



Dédicace

Je dédie ce travail à :

Ma mère et mon père.

Mes frères.

Mes amis

CHENDI Rogiya



Listes des figures :

Figure	Titre	Page
Figure I.1	Réflexion, transmission et absorption	3
Figure I.2	Cellule solaire photovoltaïque	4
Figure I.3	principe de la conversion photovoltaïque	5
Figure I.4	L'effet photovoltaïque	6
Figure I.5	Structure du Si amorphe	7
Figure I.6	Classification des procédés de dépôt de couches minces	10
Figure I.7	Structures utilisées pour les cellules PV sur couches minces	12
Figure I.8	Schéma simplifié d'une photopile solaire en couche mince à base du CIGS	15
Figure I.9	Schéma de principe d'une cellule à base de silicium amorphe	16
Figure I.10	Les cellules à base de silicium microcristallin	16
Figure I.11	Cellules photovoltaïques en silicium multicristallin	17
Figure I.12	Structure typique d'une cellule solaire à base de couche active CdTe	19
Figure II.1	Principales structures étudiées pour le piégeage de la lumière. Les premiers ordres sont représentés pour le réseau de diffraction. La période du réseau de diffraction et du CP est notée « a »	21
Figure II.2	Diagramme de dispersion schématique d'un réseau de diffraction représenté pour les ordres de diffraction m=0, 1 et 2 et k//>0. L'angle d'incidence de la lumière noté θ_0 est considéré ici non nul	22
Figure II.3	Une vue microscopique d'une structure de cristal photonique naturel : (a) opale, (b) papillons, (c) cétoine et (d) plume	24
Figure II.4	Principe de réflexion de la lumière dans un cristal photonique naturel	25
Figure II.5	Cristaux photoniques à une, deux et trois dimensions	25

Figure II.6	Schéma d'un miroir de Bragg constitué d'un milieu diélectrique périodique fini	26
Figure II.7	Quelque type de CP 3D artificiel : (1) cubique, (2) tas de bois, (3) structure multi couches, (4) opales ou opales inversées et (5) Yablonivite	27
Figure II.8	La structure de l'opale : en haut les opales directe, en bas les opales inverse	28
Figure II.9	Cristal photonique bidimensionnel de trous d'air (connectée)	29
Figure II.10	Cristal photonique bidimensionnel de tiges diélectriques (déconnectée)	29
Figure II.11	Le réseau carré	30
Figure II.12	Le réseau triangulaire	31
Figure II.13	Structure hexagonale	32
Figure II.14	Réseau direct, réseau réciproque et zone de Brillouin avec les points de symétrie des deux réseaux les plus utilisés: (a) Réseau carré, (b) Réseau triangulaire	33
Figure III.15	Section d'une fibre microstructure (MOF)	35
Figure III.1	Fenêtre principale du programme CAD	39
Figure III.2	La fenêtre de démarrage (startup Window)	40
Figure III.3	Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit	41
Figure III.4	Propriétés sectoriels pour l'objet de guide d'ondes créé	41
Figure III.5	Disposition de configuration nom structure	42
Figure III.6	L'éditeur du Tableau de symboles	43
Figure III.7	Arrangements de calcul de profil d'index	43
Figure III.8	Distributiond'index pour la configuration nom structure (référence)	44
Figure III.9	La boîte de dialogue Paramètres de simulation DiffractMOD où les paramètres de simulation sont contrôlé	44

Figure III.10	Output Options	45
Figure III.11	Résultats de la simulation	46
Figure IV.1	Description et paramétrage d'un CP membranaire en RCWA. Dans notre cas, la source envoie des ondes planes	48
Figure IV.2	une lumière monochromatiques traversant une solution absorbante de concentration C contenue dans une cuve d'épaisseur l	49
Figure IV.3	Design de la cellule solaire étudiée avec ses principaux paramètres géométriques. Un CP1D à réseau carré est gravé dans la couche d' ITO et dans la couche active. Les paires e^--h+ générées dans le a-Si :H sont collectées via les couches TCO environnantes.	51
Figure IV.4	Couches de 100nm d'épaisseur en a-Si:H	52
Figure IV.5	Profile de l'indice de réfraction d'une référence (nom structure).	52
Figure IV.6	Les spectres de Réflexion, transmittance et l'absorption de matériau Si	52
Figure IV.7	Spectre d'absorption de la couche nom structure à base Si.	53
Figure IV.8	Spectre d'absorption de la couche nom structuré à base d'a- Si :H	54
Figure IV.9	Spectre d'absorption de la couche nom structuré à base de a : Si :H pour θ=0	54
Figure IV.10	Spectre d'absorption de la couche nom structuré à base de a : Si :H pour θ=45.	55
Figure IV.11	Spectre d'absorption de la couche nom structuré à base de a : Si :H pour θ=90.	55
Figure IV.12	Cellule à CP1D schématisée sur cinq périodes	56
Figure IV.13	Cristal photonique pour N=3, L=350 nm et ff=55%.	57
Figure IV.14	Profile d'indice de réfraction d'une CPs 1D pour N=3	57
Figure IV.15	Le spectre d'absorption de la structureCP1D pour N=3, L=350 nm et ff=55%.	58
Figure IV.16	Cristal photonique pour N=5, L=350 nm et ff=55%.	58

Figure IV.17	Profile d'indice de réfraction d'une CP 1D pour N=5	59
Figure IV.18	Le spectre d'absorption de la structureCP1D pour N=5, L=350 nm et ff=55%.	59
Figure IV.19	Cristal photonique pour N=9, L=350 nm et ff=55%.	60
Figure IV.20	Profile d'indice de réfraction d'une CPs 1D pour N=9	60
Figure IV.21	Le spectre d'absorption de la structureCP1D pour N=9, L=350 nm et ff=55%.	61
Figure IV.22	Design de la cellule solaire étudiée avec ses principaux paramètres géométriques. Un CP2D à réseau carré est gravé dans la couche d'ITO et dans la couche active. Les paires e--h+ générées dans le a-Si :H sont collectées via les couches TCO environnantes.	62
Figure IV. 23	La structure de CPs 2D d'un trous d'air.	62
Figure IV.24	Profile d'indice de réfraction d'une CPs 2D (trous d'air)	62
Figure IV.25	Le spectre d'absorption d'un trou d'air, avec L= 400nm, D=200nm.	63

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE **1**

CHAPITRE I : les cellules photovoltaïques

I.1 Introduction 3

I.2 Absorption de la lumière 3

I.3 Les cellules solaires photovoltaïques 4

I.3.1 Définition 4

I.3.2 Historique 4

I.3.3 La conversion photovoltaïque 4

I.3.4 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque 5

I.4 Silicium et dépôt de silicium utilisé dans les cellules solaires 6

I.4.1 Propriétés photovoltaïque du silicium 6

I.4.2 Silicium amorphe 7

I.4.2.1 Propriétés générales 7

I.4.2.2 Dépôt du silicium amorphe 8

I.5 Cellules solaires en couches minces 9

I-5-1 Principe de fonctionnement des cellules solaires à couches minces de silicium 9

I-5-2 Techniques de dépôt des couches minces 10

I-5-3 Caractéristique d'une couche mince 11

I-5-4 Structures des cellules photovoltaïques sur couches minces 12

I.6 Les avantages des couches minces 13

I.7 Les différentes structures et filières des cellules solaires en couches minces 14

I-7-1 Structure d'une couche mince à base de CIGS 14

I-7-2 Cellules photovoltaïque tandem 15

I-7-3 Cellules photovoltaïque multi-jonction 15

I-7-4 Les cellules à base de silicium 16

I-7-5 Les cellules à base de silicium amorphe 16

I-7-6 Les cellules à base de silicium microcristallin 16

I-7-7 Cellules photovoltaïques en silicium multicristallin 17

I-7-8 Les cellules de type Schottky 17

I-7-9 La Filière chalcopyrite Cu-III-VI_2 18

I-7-10 La filière CdTe 18

I.8 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque 19

I.8.1 Avantage 19

I-8-2 Inconvénients 20

I.9 Conclusion 20

CHAPITRE II : les cristaux photoniques

II.1 Introduction 21

II.2 Propriétés optiques des principales structures utilisées

pour le piégeage de la lumière incidente 21

II.2.1 Diffraction de la lumière par un réseau 22

II.2.2 Couplage de la lumière avec les modes d'un cristal photonique 23

II.3 Définition des cristaux Photoniques 24

II.4 Différents types des cristaux photoniques 25

II.4.1 Les cristaux photoniques unidimensionnels (réseau de Bragg) 25

II-4-2 Cristaux photoniques bidimensionnelle 2D 26

II-4-3 Cristaux photoniques tridimensionnels 3D 26

II.5 Cristaux photoniques bidimensionnels 2D 28

II-5-1 Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels 29

II.5.1.1 Le réseau carré 30

II-5-1-2 Le réseau triangulaire 30

II-5-1-3 Le réseau hexagonal 31

II-5-2 Paramètres du réseau 32

II-5-2-1 Réseaux direct et réciproque à deux dimensions 32

II-5-2-2 Facteur de remplissage 33

II-5-3 Domaines d'application des cristaux photoniques 2D 33

II-5-3-1 Fréquence optique 33

II-5-3-2 Fréquences micro-ondes 35

II-5-3-3 Etat de l'art de la photonique pour le photovoltaïque 35

II.6 Conclusion 36

CHAPITRE III : Présentation du logiciel Rsoft CAD

III.1 Introduction 37

III.2 Présentation du logiciel Rsoft CAD 37

III.2.1 Environnement de CAD 37

III-2-2 Le simulateur « DiffractMOD» 38

III.3 Méthode de modélisation 38

III-3-1 Méthode modale de Fourier (RCWA) 38

III.4 Les étapes de simulation 39

III-4-1 Création d'un nouveau circuit 40

III-4-2 Création d'un structure dans le CAD Rsoft 41

III-4-3 Définition des variables 42

III-4-4 Vérification de la structure 43

III-4-5 Configuration du paramètre simulé 45

III-4-6 L'exécution de la simulation 45

III-4-7 La lecture des résultats 46

III-6 Présentation d'autres applications 46

III.7 Conclusion 47

CHAPITRE IV : Résultats et discussions

IV.1 Introduction 48

IV-2 Caractérisation optique des échantillons intégrant un CP 49

IV-2-1 Loi d'absorption de la lumière - loi de Beer-Lambert 49

IV.2.2 Design optique d'une cellule solaire intégrant un CP membranaire absorbant 50

IV.3 Les structures étudiées 51

IV.3.1 couche mince (référence) 52

IV-3-1-1Structure étudiée 52

IV-3-1-2Distribution de l'indice de réfraction 52

IV-3-1-3 Les spectres d'absorption pour Si et a-Si :H 53

IV-3-2 Structure a CPs 1D 55

IV-3-2-1Structure étudiée 56

IV-3-2-2Le spectre d'absorption et distribution de l'indice de réfraction pour différents nombres de N 56

IV-3-3 Structure a CPs 2D (Trous d'air) 61

IV-3-3-1Structure étudiée 62

IV-3-3-2 Le spectre d'absorption d'un trou d'air 63

IV.6 Conclusion 64

CONCLUSION GENERALE **65**

BIBLIOGRAPHIE **66**

RESUME

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale:

La technologie photovoltaïque permet de produire de l'électricité de manière respectueuse pour l'environnement, en utilisant une source d'énergie quasiment infinie : le soleil. Aujourd'hui, la plupart des cellules solaires commercialisées sont produites en utilisant du silicium monocristallin ou polycristallin. Ces cellules solaires peuvent atteindre des rendements photovoltaïques de l'ordre de 24.7% avec une lumière nom concentrée (Green et al, 2006). Toutefois, les inconvénients majeurs sont le coût élevé du matériau et la forte consommation d'énergie au cours de la production.

Portée par un contexte économique et social favorable, la recherche dans le domaine des cellules solaires photovoltaïques (PV) s'est intensifiée depuis plus de deux décennies, avec pour fil conducteur la volonté de créer une technologie mature et compétitive. Dans ce contexte, l'optimisation des matériaux et des procédés technologiques employés a longtemps été mise au premier plan. Avec le développement des cellules solaires en couches minces, une étape importante a été franchie dans la réduction des coûts grâce à la diminution de l'épaisseur de la couche active. Cependant, la faible absorption de la lumière, en particulier pour les longueurs d'onde situées près du gap du matériau absorbant, a rapidement été identifiée comme la limitation principale de ces cellules. Une attention particulière s'est donc portée sur ces pertes optiques, qui sont encore plus critiques lorsqu'on considère des couches ultraminces dont les épaisseurs sont de l'ordre du micromètre, voire moins.

Pour traiter ce problème, les texturations relevant de l'optique géométrique pour les cellules à base de wafers de silicium s'avèrent inadaptées car de dimensions bien supérieures à l'épaisseur d'une couche mince. De ce fait, des concepts d'ingénierie photonique plus avancés ont été développés en introduisant des nanostructures afin d'améliorer la collection de la lumière, mais aussi assurer un piégeage efficace des photons dans la couche active pour les longueurs d'onde où l'absorption est normalement faible [1].

Dans ce travail de mémoire nous nous sommes intéressés à l'étude des cristaux photoniques pour le contrôle de variation de l'absorption dans les cellules solaires photovoltaïques fabriques à couches d'a-Si :H caractérisé par nombre des périodes variant et de géomètre optimal. Ce manuscrit est constitué de quatre chapitres :

Le premier est consacré le fonctionnement général d'une cellule solaire. Le dépôt de silicium utilisé dans les cellules solaire. Les cellules en couches minces. D'autre part, nous allons étude les différentes structures et filières cellules solaire en couches minces.

Dans le deuxième chapitre, nous introduisons les cristaux photoniques. L'énumération des différents cristaux photoniques. Afin de mieux comprendre les cristaux photoniques bidimensionnels CPs 2D et les applications de CPs 2D.

Dans le chapitre III, nous décrirons la méthode numérique que les logiciels de simulation utilisés dans ce travail pour modéliser les couches minces (non structurée) et les structures cristaux photoniques, unidimensionnel, bidimensionnels à trous d'airs et en utilisant l'outil de simulation DiffractMOD de Rsoft CAD.

Le chapitre IV, introduire la méthodologie générale pour le calcul des propriétés optiques des cellules à CP. Cela englobe les spectres de réflexion et de transmittance des structures simulées mais également le calcul de leur absorption intégrée. Les résultats présentés dans la suite de ce manuscrit ont été obtenus principalement grâce à des simulations utilisant la méthode dite « Rigorous Coupled-Wave Analysis » (RCWA) [1].

CHAPITRE I

LES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES

I-1 Introduction

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables: l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Excepté l'énergie géothermique qui provient de la chaleur des profondeurs de la terre, ces sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera. L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable [2].

I-2 Absorption de la lumière

La lumière se compose de photons, «grains de lumière», chacun porteur d'une énergie dépondant de sa longueur d'onde (ou couleur du rayon).

Ces photons peuvent pénétrer dans certaines matières même passé au travers : les objets transparents pour notre œil laissent passer la lumière visible.

Plus généralement, un rayon lumière qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques :

- **Réflexion** : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet.
- **Transmission** : la lumière traverse l'objet.
- **Absorption** : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas l'énergie est restituée sous une autre forme [3].

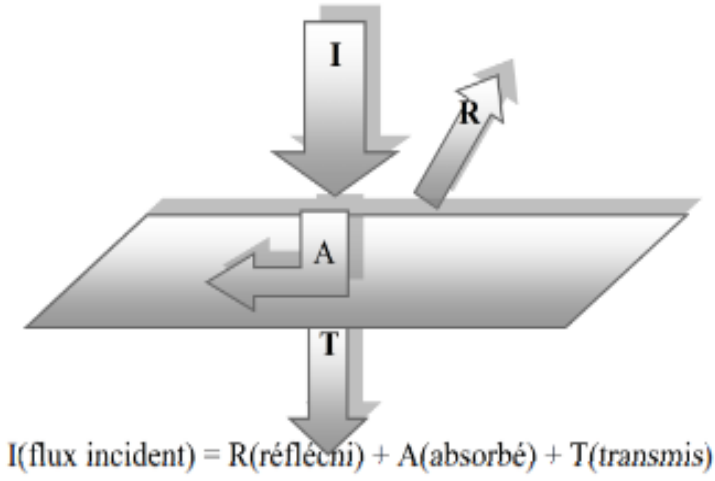


Figure I-1 Réflexion, transmission et absorption [3].

I-3 Les cellules solaire photovoltaïque

I-3-1 Définition

Les cellules photovoltaïque ou les plaques solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé ‘‘effet photovoltaïque’’[4].



Fig. I.2. Cellule solaire photovoltaïque [5].

I-3-2 Historique

Le principe de l'effet photoélectrique (transformation directe d'énergie portée par la lumière en électricité) a été appliqué dès 1839 par Edmond Becquerel qui a noté qu'une chaîne d'éléments conducteurs d'électricité donnait naissance à un courant électrique spontané quand elle était éclairée. Plus tard, le sélénium puis le silicium (qui a finalement pour des raisons de coût supplanté le cadmium-tellure ou le cadmium-indium-sélénium également testés) se sont montrés aptes à la production des premières cellules photovoltaïques (posemètres pour la photographie dès 1914, puis 40 ans plus tard (en 1954) pour une production électrique. La recherche porte également aujourd’hui sur des polymères et matériaux organiques (éventuellement souples) susceptibles de remplacer le silicium [6].

I-3-3 La conversion photovoltaïque

La conversion d’énergie photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physique, intimement liés et simultanés :

- L'absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques.
- La collecte des charges.

Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque [3].

I-3-4 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteurs de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la second, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction PN a été formé (Figure.I.3) [7].

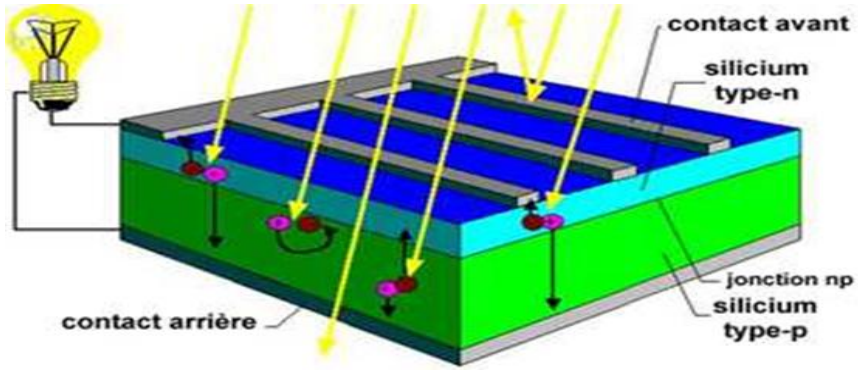


Figure I.3 : Principe de la conversion photovoltaïque [7].

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont ''bombardés'' par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être ''arrachés / décrochés'' : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau.

L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons '' décrochés '' créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique du photon est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque [8].

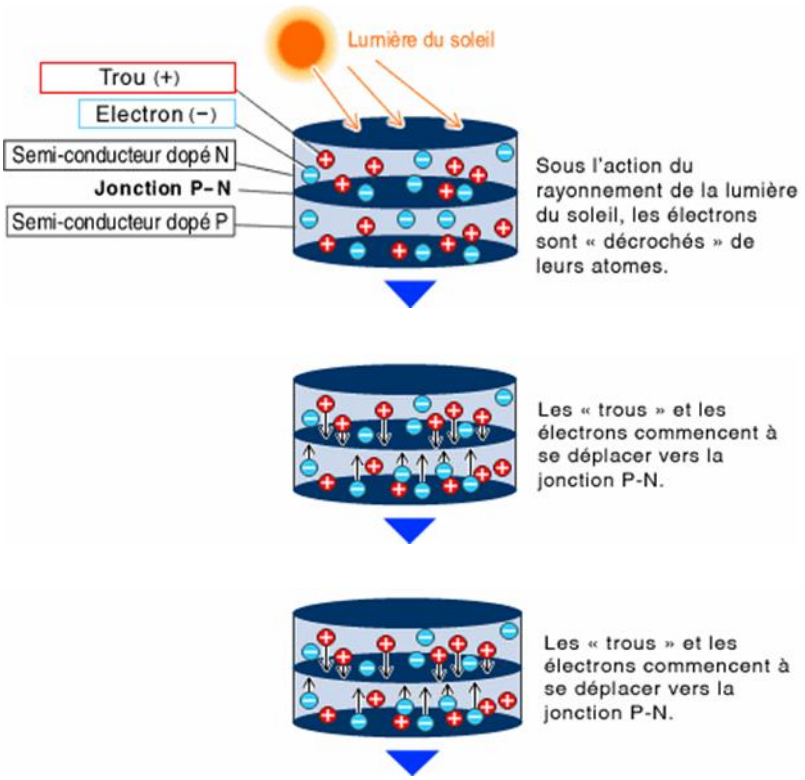


Figure I.4 :L'effet photovoltaïque [7].

I-4 Silicium et dépôt de silicium utilisé dans les cellules solaires

I-4-1 Propriétés photovoltaïque du silicium

Aujourd'hui, plus de 99% des équipements photovoltaïques utilisent le silicium comme matériau de base. Ce dernier se présente sous différentes formes, les plus répandues étant le silicium monocristallin, le silicium polycritallin et le silicium amorphe [7].

Le silicium offre de nombreux avantages. Il est présent en abondance dans la croute terrestre (20%). C'est un matériau non toxique. Enfin, il est aisé de modifier les propriétés électriques du silicium en introduisant dans la matrice des atomes dopants tels que le Bore (induisant un dopage de type p) ou le Phosphore (induisant un dopage de type n).

D'un point de vue photovoltaïque, le seul inconvénient du silicium réside dans sa structure électronique qui présente un gap indirect (1,12 eV) et qui ne correspond donc pas exactement au maximum d'intensité du spectre solaire

I-4-2 Silicium amorphe

I-4-2-1Propriétés générales

Les cellules de silicium amorphe sont le plus souvent à jonction de type p-i-n. Les couches d'a-Si :H de type P et N sont séparées par une couche dite intrinsèque d'a-Si :H où les électrons sont photogénèses. La cellule est de couleur grise très foncée. C'est les cellules des calculatrices et des montres dites "solaires".

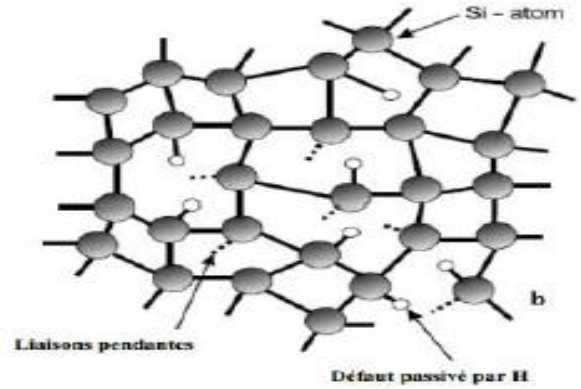


Figure I.5 : Structure du Si amorphe.

Ces défauts créent des états dans le milieu du gap qui rendent le dopage inefficace et donc ce matériau inutilisable pour des applications en microélectronique. Heureusement, ces liaisons pendantes peuvent être passivées par l'hydrogène, ce qui permet de réduire la densité de défauts de10^{15}-10^{16} cm-3 et de redonner aux matériaux ses propriétés semi-conductrices. C'est pourquoi onnomme ce matériau silicium amorphe hydrogéné (a- Si : H).

Pour le a-Si:H, l'ordre à longue distance est inexistant, seul subsiste un ordre local, de quelques distances interatomiques dans le a-Si:H, un atome de silicium peut avoir une coordination - nombre de liaisons avec ses plus proches voisins - de 3 ou de 5. Il apparaît donc des liaisons pendantes ou flottantes.

Il y a plusieurs avantages à l'a-Si :H une fois utilisé comme matériau semi-conducteur dans des dispositifs photovoltaïque. L'a-Si :H est un meilleur absorbant de la lumière visible. Avec une couche beaucoup plus mince absorbante d'a-Si :H (~0.5µm) procure une absorption suffisante et le coût du matériau de ce fait est considérablement réduit. Un autre avantage important d'a-Si :H consiste en ses propriétés optoélectronique exceptionnelle.

Le dopage de la phase gazeuse est également un des avantages les plus importants de ce matériau. Ça peut être dopé de type p par B_2H_6et type n par PH_3 . La fabrication des cellules solaires du a-Si :H est un candidat principale pour devenir par la suite un concurrent sérieux avec des sources conventionnelles d'électricité. Malgré les avantages ci- dessus du a-Si :H, il souffre de certaines limitations : (i) augmentation de la densité des liaisons pendantes par alliage, (ii) dégénération des propriétés optoélectroniques sous l'irradiation solaire prolongée (c-à-d. dégradation induite par lumière) et (iii) disparité du matériau avec le spectre solaire [8].

I-4-2-2 Dépôt du silicium amorphe

Historiquement, le premier dépôt de silicium amorphe a été réalisé dans un réacteur PECVD radio fréquence. C'est aujourd'hui, la méthode la plus communément utilisée avec une fréquence du plasma de 13,56 MHz. Le silane (SiH4) est dissocié dans un plasma d'argon et d'hydrogène à une température inférieure à 250°C.D'un point de vue industriel, l'inconvénient de cette technique réside dans la faible vitesse de dépôt comprise entre 1 Å/s et 2 Å/s. Néanmoins, le procédé basse température ouvre un large choix de support pour le dépôt: verre, aciers ou films plastiques.

Afin d'augmenter les vitesses de dépôt tout en conservant la qualité du matériau, de nouvelles conditions expérimentales ont été testées. En augmentant la pression (5 - 10 mbar au lieu de 0,5 - 0,7 mbar habituellement) et la puissance du plasma, une vitesse de 12 Å/s a été atteinte. Une autre solution mise en œuvre par l'IMT de Neuchâtel consiste à accroître la fréquence du plasma jusqu'à 300 MHz. Le procédé dit VHF PECVD (Very High Frequency PECVD) permet d'obtenir une vitesse de dépôt de 10 Å/s

Une autre méthode basée sur la dissociation du silane par un filament chauffé entre1600°C et 2000°C, appelée HotWire CVD (HWCVD) permet d'atteindre des vitesses de dépôt de l'ordre de 30 Å/s.

I-5 Cellules solaires en couches minces

De manière générale, les technologies couches minces recouvrent l'utilisation de matériau dont l'épaisseur nécessaire à l'absorption des photons est de quelques microns. C'est le cas des matériaux III-V tels que l'arséniure de galium et ses alliages, les composés à base de cuivre indium, sélénium (CIS) ou le tellure de cadmium (CdTe).

Ces matériaux possèdent tous un coefficient d'absorption élevé qui permet d'obtenir des rendements élevés. Le CdTe possède une largeur de bande interdite de 1,45 eV, et des rendements de 16% sont possibles. L'alliage CIS compense la faible valeur de sa bande interdite, 1 eV, par un coefficient d'absorption très élevé. L'ajout de gallium et de soufre en substitution respectivement à l'indium et au sélénium permet d'augmenter la largeur de la bande interdite et, par conséquent, d'obtenir de très bons rendements (18,8%).

Cependant, ces matériaux sont onéreux et leur mise en œuvre nécessite l'utilisation de cadmium, élément lourd, néfaste au respect de l'environnement. Ce dernier aspect limite l'expansion de cette technologie.

Les technologies couches minces concernent également les cellules à base de silicium amorphe et microcristallin. Les propriétés optiques de ces matériaux, différentes de cellules du silicium cristallin, autorisent la formation de cellules photovoltaïques avec des épaisseurs de couches absorbantes de 1 à 2 μm seulement [6].

I-5-1 Principe de fonctionnement des cellules solaires à couches minces de silicium

L'a-Si :H est un matériau qui montre une grande densité de défauts et par conséquent des longueurs de diffusion courtes (c.-à-d. que la distance moyenne parcourue par les porteurs de charge avant qu'ils recombinent est courte). De ce fait, une configuration de type p-n n'est pas envisageable pour ce matériau (Sauvais et al, Les cellules solaires basées sur de l'a-Si :H consistent en un empilement de couches p-i-n(ou n-i-p)).

Les couches minces dopées de type p et n assurent l'existence d'un champ au sein de la couche i (couches absorbantes) Permettant la séparation des porteurs de charge photo-générée. Les cellules solaires à couches minces de silicium sont communément déposées sur un substrat verre, de manière à assurer une pénétration et un piégeage efficaces de la lumière. L'a-Si :H absorbe efficacement la lumière entre 300 et 800 nm.

La structure des films, amorphe dépend des paramètres de dépôt (rapport des concentrations entre silane et hydrogène dans la phase gazeuse, fréquence d'excitation du plasma, température du substrat, Pratiquement tous les dépôts de couche de TCO sont effectués à température ambiante. Seul le contact avant de TCO des cellules en configuration p-i-n est déposé à 400°C. Etant donné la densité de défauts élevée et corrélativement les courtes distances de diffusion de l'a-Si :H, les cellules solaires basées sur de l'a-Si :H présentent une structure de type p-i-n (ou n-i-p), Quasiment toutes les cellules minces en

silicium préparées aujourd'hui sont éclairées au travers de la couche p. Dans la configuration p-i-n, le contact avant est réalisé par une couche TCO d'épaisseur 800 nm [8].

I-5-2 Techniques de dépôt des couches minces

Les méthodes utilisées pour le dépôt des couches minces peuvent être divisées en deux groupes basés sur la nature du processus physique ou chimique du dépôt. Les méthodes physiques incluent le dépôt physique en phase vapeur dite "PVD" (Physical Vapor Deposition), l'ablation laser, l'évaporation thermique, et la pulvérisation cathodique "Sputtering". Les méthodes chimiques incluent, les méthodes de dépôt en phase gazeuse et en phase liquide. Les méthodes en phase gazeuse sont : le dépôt à vapeur chimique (ChemicalVaporDeposition CVD) et l'épitaxie à couche atomique (Atomic Layer Epitaxy ALE), tandis que les méthodes de spray pyrolyse, sol-gel, spin-coating et dip-coating emploient des solutions comme précurseurs [9].

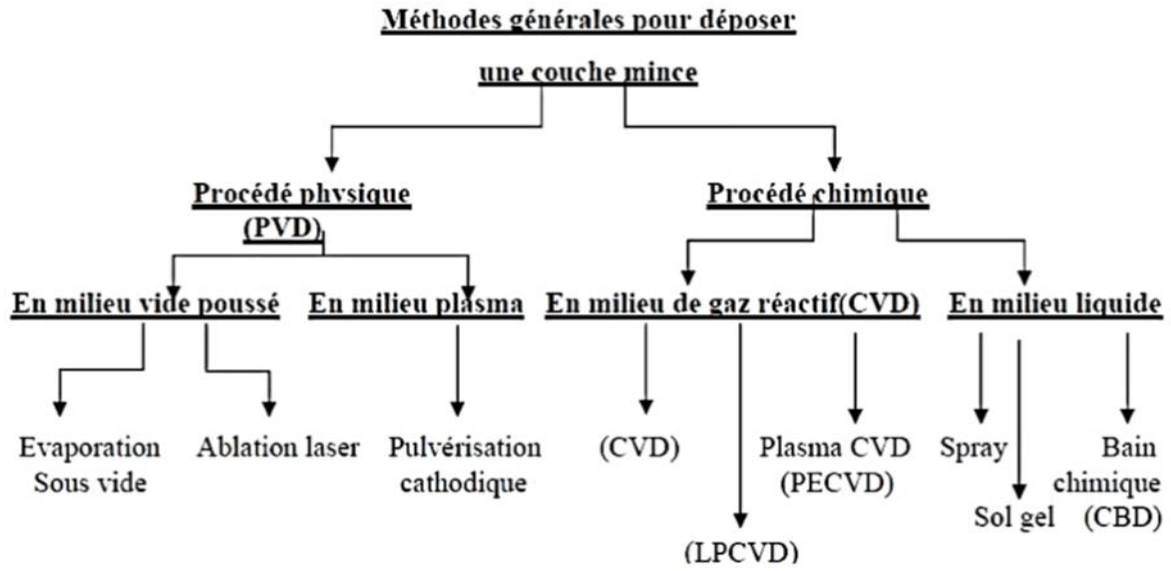


Figure I.6 : Classification des procédés de dépôt de couches minces [9].

I-5-3 Caractéristique d'une couche mince

La seconde caractéristique essentielle d'une couche mince est que, quelle que soit la procédure employée pour sa fabrication, elle reste toujours solidaire du support sur lequel elle est construite (même si, après coup, il arrive parfois que l'on puisse séparer le film mince dudit support). En conséquence, il sera impératif de tenir compte de ce fait majeur dans la conception, à savoir que le support influence très fortement les propriétés structurales de la couche qui y est déposée. Ainsi, une couche mince d'un même matériau, de même épaisseur

pourra avoir des propriétés physiques sensiblement différentes selon qu'elle sera déposée sur un substrat isolant amorphe tel que le verre, ou un substrat monocristallin de silicium par exemple.

Il faut aussi noter qu'eu égard au procédé de fabrication employé, une couche mince est souvent fortement polluée lors de sa fabrication par les molécules gazeuse environnantes, à tel point que sa structure juste après formation s'apparente sensiblement à celle d'une éponge, et que cela va évidemment avoir aussi une influence sur les propriétés physiques. On sera généralement amené à faire subir à une couche mince un traitement post-déposition destiné à en améliorer la structure, c'est à dire à éliminer au mieux les gaz occlus qui, sauf exception, n'apportent aucune caractéristique intéressante au matériau. On imagine aisément que selon la procédure employée le résultat obtenu pourra donc être sensiblement différent.

Il résulte cependant de ces deux caractéristiques essentielles d'une couche mince (bidimensionnalité et présence d'un substrat support de fabrication sur lequel la couche est construite par empilement successif d'atomes) la conséquence suivante: une couche mince est anisotrope par construction.

Les principales méthodologies de fabrication utilisées par les fabricants de composants électroniques actifs ou passifs font appel à des procédures physiques de dépôt du matériau sur un substrat initialement dépourvu de dépôt. La couche mince va donc croître en épaisseur à partir de zéro. Il est à noter que bien que l'on dispose de procédés de décapage permettant de niveler angström par angström un matériau, on n'utilise pratiquement jamais ce moyen pour obtenir une couche mince d'épaisseur donnée [6].

I-5-4 Structures des cellules photovoltaïques sur couches minces

Les cellules PV sur couches minces ont besoin de support pour leur tenue mécanique. La structure de la cellule photovoltaïque varie selon la technologie d’élaboration de la couche mince et le matériau de support.

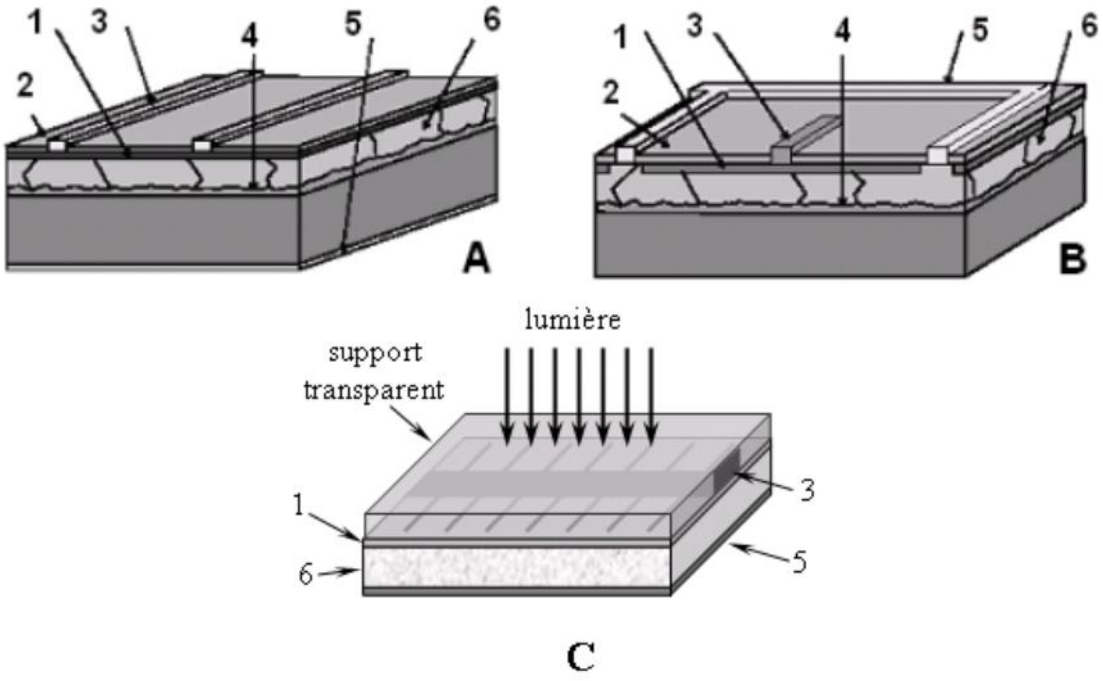


Figure I.7 : Structures utilisées pour les cellules PV sur couches minces [9].

A : support conducteur (pas de report de couche), B : support isolant (pas de report de couche), C : cellule biface (report de couche).

1 : émetteur ; 2 : couche antireflet ; 3 : contact à l'émetteur; 4 : couche intermédiaire; 5 : contact au substrat ; 6 : substrat en silicium.

La composition des cellules A et B est utilisé pour les couches minces obtenues sans report. La structure (A) est utilisée si le support est un conducteur. Dans ce cas le support sert de contact arrière. La couche intermédiaire peut servir pour améliorer le contact entre le support et le substrat, la réduction de la recombinaison sur la face arrière et comme réflecteur arrière. Si le support est isolant, tous les contacts doivent être placés sur la même face de la cellule PV (structure B). Pour cela les contacts ohmiques et l'émetteur ont la forme de peignes inter digités. La réalisation de ce type de contacts nécessite l'utilisation de sérigraphie alignée ou de lithographie.

La cellule de type (C) peut être élaborée par transfert de couche épitaxie. Dans ce cas, la cellule est réalisée partiellement sur la couche épitaxie. Un rendement de 15.4% a été démontré pour une cellule de type (C) par Brendel et al. Et pour une cellule sur une couche épitaxie de 22 µm d'épaisseur.

I-6 Les avantages des couches minces

En plus d'une consommation bien moins importante en silicium, les cellules photovoltaïques en couches minces ont de nombreux avantages par rapport aux cellules en silicium massif. D'abord, le rendement théorique limite est plus élevé dans des dispositifs minces. Ceci s'explique par la diminution linéaire du taux de recombinaison en volume avec la diminution de l'épaisseur, alors que l'absorption de la lumière demeure presque inchangée (80 µm de silicium suffisent pour absorber 90% des photons incidents).

Dans le cas d'un matériau idéal (pas de recombinaison Schockley-Reed-Hall, juste Auger), et avec une vitesse de recombinaison en surface nulle (passivation idéale), l'épaisseur optimale a été calculée pour être d'environ 80 µm avec un rendement de conversion de 28,8%. En dessous, l'absorption fait défaut, et au-dessus, la recombinaison Auger devient trop importante.

Les couches minces possèdent également une faible tolérance quant à la qualité du matériau. En effet, si l'on considère un matériau avec une longueur de diffusion des porteurs minoritaires égale ou inférieurs à l'épaisseur de la cellule, les performances seront faibles. En revanche, si on réalise des cellules dont l'épaisseur est inférieure à la longueur de diffusion des porteurs, alors le taux de collection sera plus élevé.

L'utilisation de couche de silicium microcristallin ou polycristallin peut être limitée par un rendement (<15%). Aussi la recherche s'oriente également vers la fabrication de cellules photovoltaïques basée sur le report de films minces de silicium monocristallin sur des substrats économiques. En effet, seul le silicium monocristallin autorise l'obtention de rendements de conversion supérieurs à 20% [9].

I-7 Les différentes structures et filières des cellules solaires en couches minces

Les performances des cellules solaires dépondent de nombreux paramètres, tels que l'absorption, le transport de charge, la longueur de diffusion des porteurs, les états d'interfaces, etc… . Le choix des matériaux constituant les couches et les électrodes métalliques est nécessaire pour obtenir un bon rendement de conversion. Ce dernier peut être amélioré en utilisant des absorbeurs ayant un coefficient d'absorption élevé. Le rendement de la cellule dépend en outre de la structure élaborée et de qualité de diverses couches, autrement dit des divers procédés de croissance.

Nous citons dans ce qui suit les différentes filières existantes dans la fabrication des cellules solaires en couches minces [8].

I-7-1 Structure d'une couche mince à base de CIGS

Il existe six éléments principaux dans les photopiles en couches minces, à savoir :

- Le substrat : le plus utilisé est le verre sodé, on peut aussi utiliser des substrats flexibles (type Upolex) ou métalliques.
- Un contact ohmique inférieur : souvent le Mo.
- Une couche absorbante : dans ce cas le CIGS.
- Une couche tampon : de CdS. C'est à cette interface que se situe la jonction p-n.

Comme on peut utiliser l'In2S3 ou le ZnS pour réaliser cette couche.

- Un oxyde transparent conducteur (OTC) : Le ZnO dans notre cas ou bien l'ITO.
- Un contact ohmique supérieur (grille métallique : Al).

A ceci est ajoutée parfois une couche anti-réflexion. Ces matériaux ne sont pas bien évidemment choisis au hasard et doivent posséder des propriétés physico-chimiques bien particulières.

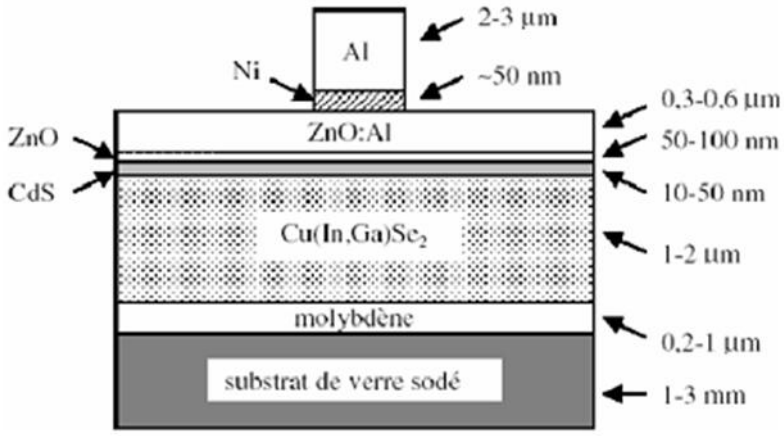


Figure I.8 : Schéma simplifié d'une photopile solaire en couche mince à base du CIGS [9].

I-7-2Cellules photovoltaïque tandem

Empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbant dans des domaines spectraux se chevauchant, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines.

- **Avantage**
  - Sensibilité élevée sur un large de longueur d'onde.
  - Excellent rendement.
- **Inconvénient**
  - Coût élevée dû à la superposition de deux cellules.

I-7-3Cellules photovoltaïque multi-jonction

Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces qui utilisent l'épitaxie par jet moléculaire. Une cellule triple jonction, par exemple, est constituée des semi-conducteurs GaAs, Ge et $GaInP_2$. Chaque type de semi-conducteur est caractérisé par une longueur d'onde maximale au-delà de laquelle il est incapable de convertir le photon en énergie électrique (cf. bande interdite). D'un autre côté, en deçà de cette longueur d'onde, le surplus d'énergie véhiculé par le photon est perdu. D'où l'intérêt de choisir des matériaux avec des longueurs aussi proches les unes des autres que possible (en multipliant leur nombre d'autant) de manière à ce qu' une majorité du spectre solaire soit absorbé, ce qui génère un maximum d' électricité à partir du flux solaire [8].

I-7-4 les cellules à base de silicium

On distingue au sein même de cette famille, plusieurs types de cellules utilisant des ''qualités'' de silicium différentes : les cellules à base de Si mono-cristallin (rendement de l'ordre de 25%, coût de fabrication élevé), les cellules à base de Si poly-cristallin (rendement de l'ordre de 20%coût de fabrication moindre) et les cellules à base de Si amorphe (rendement et coût plus faibles que le mono ou le poly-cristallin) [8].

I-7-5 les cellules à base de silicium amorphe

Se dit d'un silicium non cristallin, moins cher et productif que le silicium cristallin. Il est plus adapté pour l'alimentation d'appareils nécessitant une petite puissance électrique, de l'ordre de 10mW à 100W.

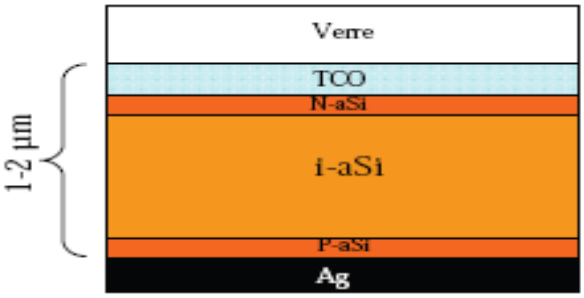


Figure I.9 : Schéma de principe d'une cellule à base de silicium amorphe [10].

I-7-6 les cellules à base de silicium microcristallin



Figure I.10 : les cellules à base de silicium microcristallin [5].

Une cellule photovoltaïque à base de silicium microcristallin. Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grand dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

- **Avantage**
  - Bon rendement, de 14% à16%,
  - Nombre de fabrication élevé.
- **Inconvénient**
  - Coût élevé.

I-7-7 Cellules photovoltaïques en silicium multicristallin

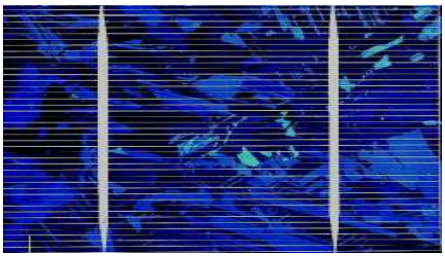


Figure I. 11 : Cellules photovoltaïques en silicium multicristallin [5].

Une cellule photovoltaïque en silicium multicristallin. Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

- **Avantage**
  - Cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module.
  - Bon rendement de conversion, environ 100Wc/m^2, mais cependant un peu moins bon que pour le monocristallin.
  - Lingot moins cher à produire que le monocristallin
- **Inconvénient**
  - Rendement faible sous un faible éclairement ou soleil diffus.

I-7-8 Les cellules de type Schottky

Ce type de cellule utilise un semi-conducteur de type p (ou n) pris en sandwich entre deux électrodes de métal. La zone active pour la conversion photovoltaïque se situe entre une des électrodes de métalliques et le semi-conducteur.

I-7-9 La Filière chalcopyrite Cu-III-VI_2

La Filière chalcopyrite engendre deux avantages essentiels pour la conversion photovoltaïque terrestre car elle répond exactement aux critères définis par cette dernière, à savoir son application en couches minces, sa tenue aux impuretés et sa stabilité à l'éclairement et même à l'effet des rayonnements cosmiques.

Cette filière regroupe deux aspects : la possibilité de faire croitre des couches minces polycristallines moins coûteuses et la stabilité des propriétés de conversion. Les points clés de cette filière se résument comme suit :

- Haute efficacité.
- Stabilité meilleure.
- Faible coût.
- Adaptation aux différents procédés de dépôt.

La Filière chalcopyrite est considérée comme étant le marché d'avenir le plus prometteur pour la fabrication de modules photovoltaïque. Les rendements enregistrés en laboratoire ont atteint les 20% alors qu'en module il affiche 13%.

Les principaux matériaux de cette filière sont le$CuInSe_2$, $CuInS_2$, $CuGaSe_2$, d'énergies de gap respectives 1, 1.5 et 1.7 eV. Contrairement au silicium amorphe, les cellules à base de CIGS ne montrent aucune dégradation sous l'effet de l'exposition continue à la lumière. Pour augmenter la valeur de l'énergie du gap du $CuInSe_2$, reste un peu éloignée de la partie la plus intense du spectre solaire, le gallium a été substitué à l'indium pour modifier l'énergie pour se situer à une énergie de gap entre celle du $CuInSe_2$ et du$CuGaSe_2$. On parle ainsi de composés $Cu(In, Ga)Se_2$ qui sont devenus, de nos jours, les matériaux les plus prometteurs de cette filière [8].

I-7-10 La filière CdTe

Le CdTe est un matériau bien adapté en couches minces son utilisation dans la conversion photovoltaïque en raison de ses propriétés :

- Une énergie de gap de 1,45 eV, très bien adaptée au spectre solaire.
- Un gap énergétique direct assurant une grande absorption optique.
- Matériau adapté aux techniques de croissances simples et à faible coût.

Le CdTe est naturellement de type n, sa conversion vers une conductivité p est assurée par un recuit à 400°C. pourtant, le CdTe est doté d'une forte absorption pour des radiations de longueurs d'ondes proches de 800 nm, et pour des raisons purement expérimentales, l'épaisseur déposée est de 3-7µm, sachant l'épaisseur optimale est de l'ordre de 3µm. Le rendement de conversion est de l'ordre de

16% en laboratoire, par contre les modules industriels ont des rendements de l'ordre de 10%.

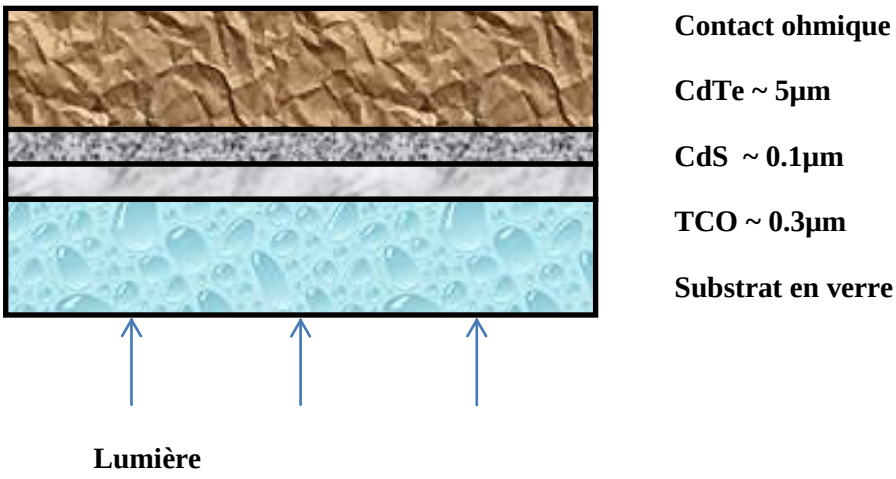


Figure I.12 Structure typique d'une cellule solaire à base de couche active CdTe.

I-8 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I-8-1 Avantages

- Une haute fiabilité ; les modules sont garantis pendant 25 ans par la plupart des constructeurs ;
- Elle ne comporte pas de pièces mobiles, qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux ;
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt ;
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique, car le produit final est non polluant, silencieux, peu de déchet, pas de ligne électrique supplémentaire et pas de nuisance sonore olfactive.

I-8-2 Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ;

- L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions ;
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28 %).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées;
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis [3].

I-9 Conclusion

Pour conclure, on peut dire que la méthode de conversion photovoltaïques est bien maitrisée de nos jours, et que des solutions existent pour s'adapter à la demande du consommateur : stockage, transformation puissance redistribuée sont modulables par l'emploi d'accumulateurs plus ou moins importants, de semi-conducteur plus ou moins productifs.

Elle peut se substituer à toute autre source de courant extérieur mais pour de grandes puissances, elle sert surtout d'appoint facile, utile mais pas toujours. La solution économique photovoltaïque est donc assez intéressante mais freinée par des investissements nécessaires trop importants. (L'avenir semble brille) à la filière solaire à couche mince de a-Si :H en ce qui concerne l'amélioration de ses principaux défauts.

CHAPITRE II

LES CRISTAUX PHOTONIQUES

II-1- Introduction

La notion de ”cristaux photoniques” a été proposée pour la première fois en 1987. Le premier cristal photonique a été réalisé en 1991. Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans une, deux ou trois dimensions. Ce milieu périodique produit sur la lumière qui se propage dans le cristal photonique un effet analogue à celui du potentiel périodique sur les électrons dans un cristal [11].

Les études se sont donc concentrées sur les cristaux photoniques 2D, pour le développement de composants d'optique intégrée planaire de taille considérablement réduite (quelques microns pour des applications optiques).

II-2- Propriétés optiques des principales structures utilisées pour le piégeage de la lumière incidente

Dans cette section, nous allons introduire les caractéristiques optiques des principales structures exploitées pour le piégeage de la lumière dans des couches de faible épaisseur.

L'intérêt de ces structures réside dans la possibilité d'augmenter fortement l'absorption sur certains intervalles de longueurs d'onde, en particulier près du gap des matériaux absorbants. Comme nous le vérifierons dans l'état de l'art, elles ne peuvent bénéficier des approches, d'optiques géométriques « classiques », comme des structurations anti-reflet pyramidales, mais doivent utiliser des approches d'optique ondulatoire. Le concept le plus simple est celui du réseau de diffraction ; des concepts plus élaborés sont les cristaux photoniques et les plasmons de surface. Ils sont représentés schématiquement sur la Figure II.1

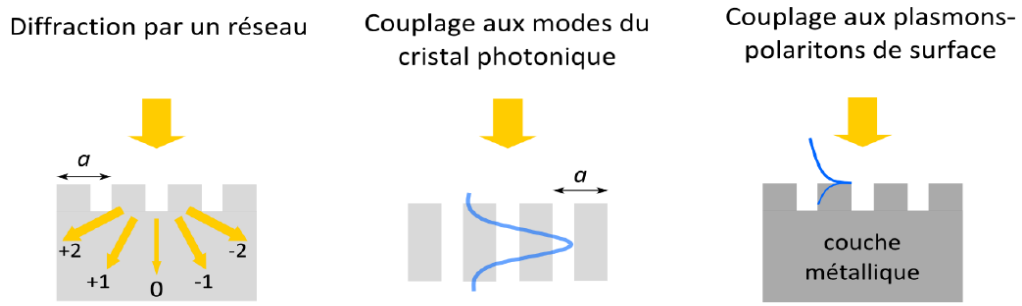


Figure II.1 : Principales structures étudiées pour le piégeage de la lumière. Les premiers ordres sont représentés pour le réseau de diffraction. La période du réseau de diffraction et du CP est notée « a » [1].

Dans un premier temps, nous chercherons à décrire ces effets séparément à l'aide de diagrammes de dispersion types, rassemblant l'essentiel de leurs propriétés physiques. Ils permettent en effet de visualiser la relation existant entre la pulsation (ω) et la norme de la composante parallèle du vecteur d'onde (notée k//). Nous les utiliserons pour comprendre les propriétés de couplage de ces différentes structures, dans le but d'augmenter l'absorption de la lumière incidente.

II-2-1- Diffraction de la lumière par un réseau

Le diagramme de dispersion d'un réseau de diffraction est représenté sur la Figure II.2 pour les deux premiers ordres de diffraction. On remarque sur cette figure la présence de « plusieurs lignes de lumière » (lignes en pointillés) définissant des « cônes de lumière » (zones en gris). Ces cônes se répètent périodiquement tous les $2\pi/a$ (à étant la période du réseau), ce qui correspond aux différent ordres de diffraction. Les ondes possédant un k //situé dans le cône de lumière peuvent interagir avec les modes du réseau. Ainsi, pour une incidence 0 de la lumière (ligne noire sur figure II.2), l'ordre 0 se propage quelle que soit la fréquence considérée car k // est toujours compris dans le cône de lumière centré en 0. Les ordres plus élevés (s'ils existent) Apparaissent pour des fréquences croissantes : ω_1 pour l'ordre 1et ω_2 pour l'ordre 2.

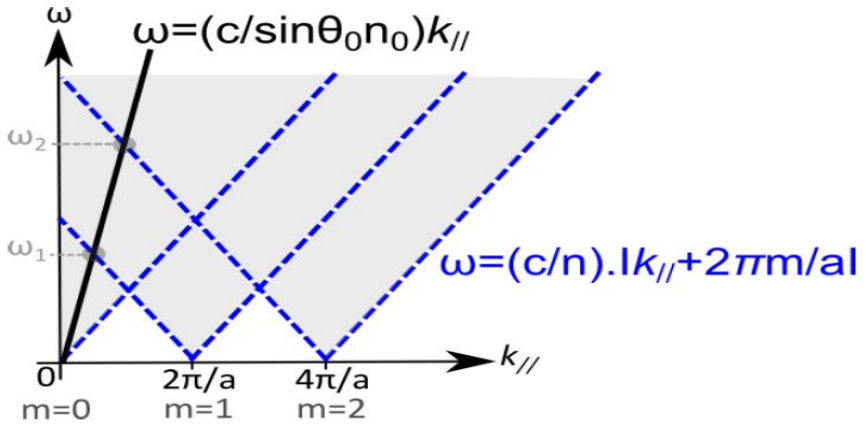


Figure II.2 : Diagramme de dispersion schématique d'un réseau de diffraction représenté pour les ordres de diffraction m=0, 1 et 2 et k//>0. L'angle d'incidence de la lumière noté θ_0 est considéré ici non nul [1].

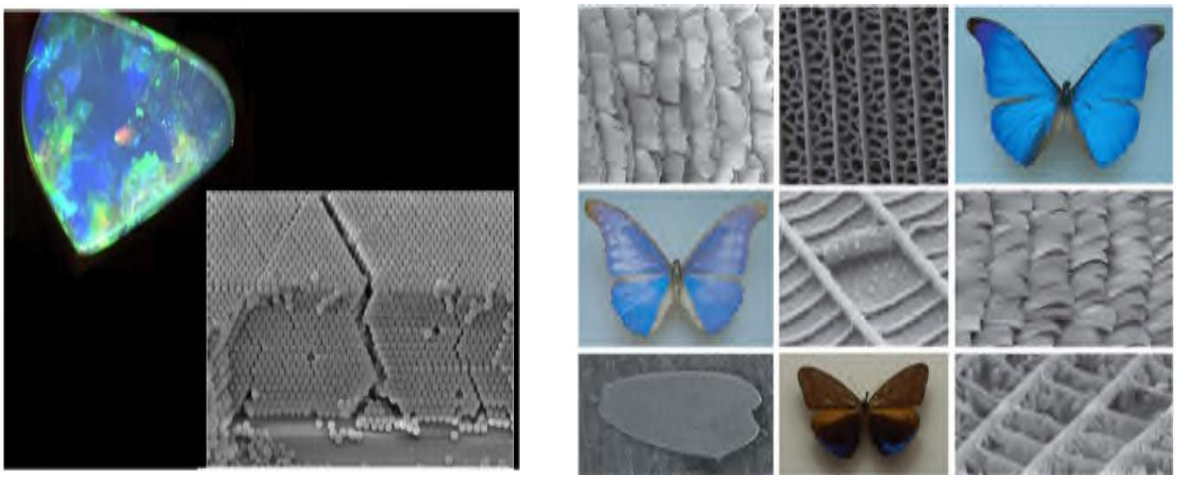
Pour une application de piégeage de la lumière, l'objectif est alors de favoriser le couplage des ondes incidentes avec les ordres diffractés transmis (m>0) afin d'allonger leur chemin optique dans la couches de matériau actif située sous le réseau de diffraction. En

diminuant l'épaisseur de cette couche jusqu'à ce qu'elle soit de l'ordre de la longueur d'onde, on quantifie les états optique dans le matériau actif. On se rapproche alors davantage d'une configuration de type cristal photonique membranaire. Ce changement progressif de physiques exploités pour le piégeage de la lumière [1].

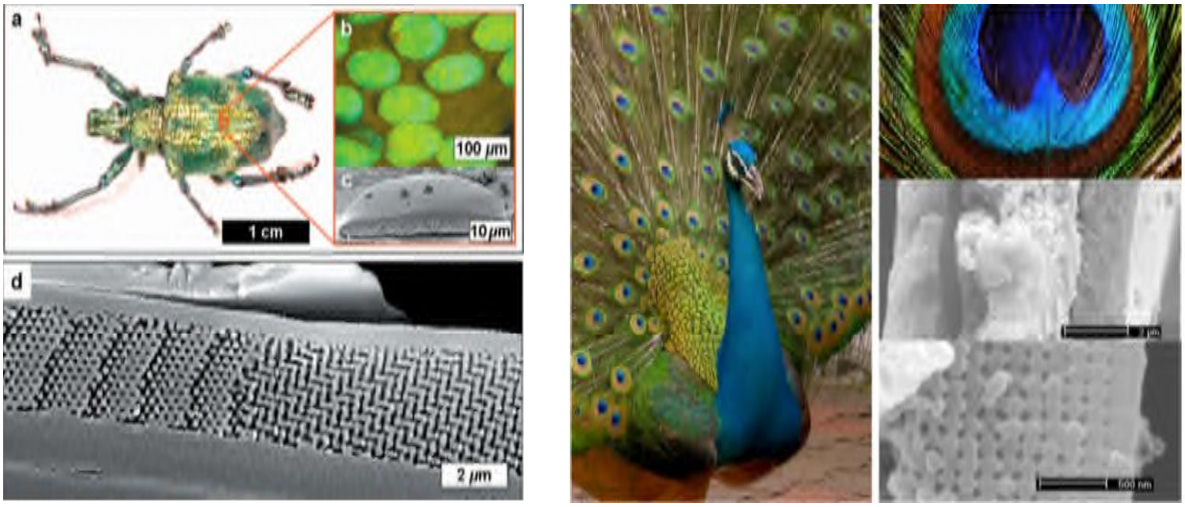
II-2-2- Couplage de la lumière avec les modes d'un cristal photonique

Il s'agite en général de milieux diélectriques structures dont la permittivité est modulée périodiquement selon une, deux ou trois direction. En pratique, la plupart des structures à CP sont réalisées au sein d'une couche mince d'indice de réfraction élevée et ayant une épaisseur de l'ordre de la longueur d'onde. Il est donc préférable d'employer le terme de « cristal photonique membranaire », qui correspond à un CP intégré au sein d'un guide d'onde plan, ce qui permet un confinement réfractif de la lumière dans l'épaisseur de la couche. Le contrôle latéral de la lumière est assuré par un effet diffractif dans une, deux ou trois directions de l'espace, selon le type de structuration considéré [1].

On distingue quatre genres de cristaux photoniques, les plus parfaits sont les cristaux photoniques naturels trouvés généralement dans l'opale qui est une roche minérale constitué de microbilles de silice répartie selon un arrangement plus au moins régulier [11] (figure II.3(a)). De même dans les ailes d'insectes telles que les papillons (figure II.3(b), cétoines bleues (figure II.3(c)) ou oiseaux (figure II.3(d) [13].



(a) (b)



(b) (d)

Figure II.3: une vue microscopique d'une structure de cristal photonique naturel :

(a) opale, (b) papillons, (c) cétoine et (d) plume [13].

D'autre part l'homme s'est inspirer de la nature pour créer des cristaux photoniques qui obéirent à nos besoins. Que ce soit dans les minéraux ou chez les vivants, les cristaux photoniques qui les constituent absorbent toute les couleurs et reflète la couleur qui apparait (figure II.4).

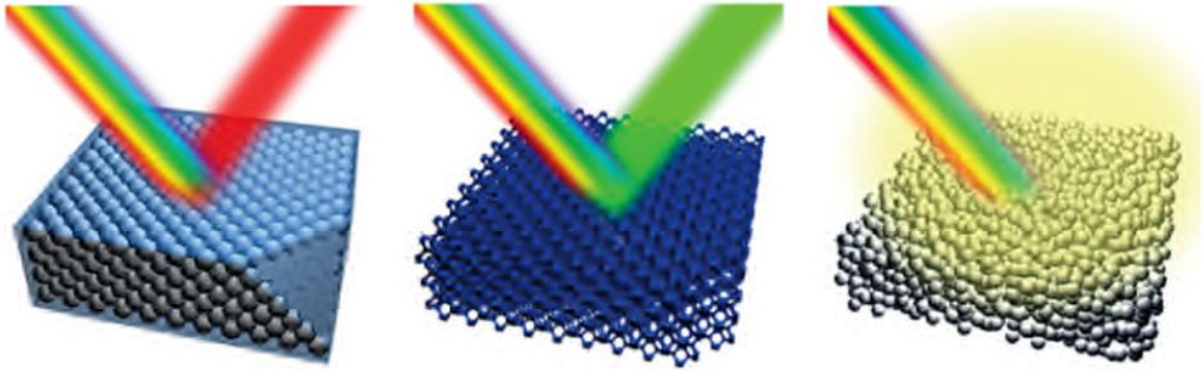


Figure II.4 : principe de réflexion de la lumière dans un cristal photonique naturel [13].

II-3- Définition des cristaux Photoniques

Les cristaux photoniques sont des matériaux dont l'indice de réfraction est module périodiquement selon une ou plusieurs dimensions de l'espace (Figure II.5). Ces structures peuvent être obtenues par arrangement périodique de deux matériaux différents. Leur forme la plus simple est une structure périodique à une dimension composée d'un empilement de couches également appelé « miroir de Bragg ». Les cristaux photoniques ont la capacité d'inhiber la propagation de la lumière dans certaines directions pour une gamme de fréquences, la bande interdite photonique (BIP). Cette particularité optique intervient lorsque la longueur de maille du cristal est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de la lumière dans le milieu. Ce phénomène est dans une certaine mesure analogue à celui de l'ouverture de bandes interdites électroniques dans des cristaux atomiques de matériaux semi-conducteurs [12].

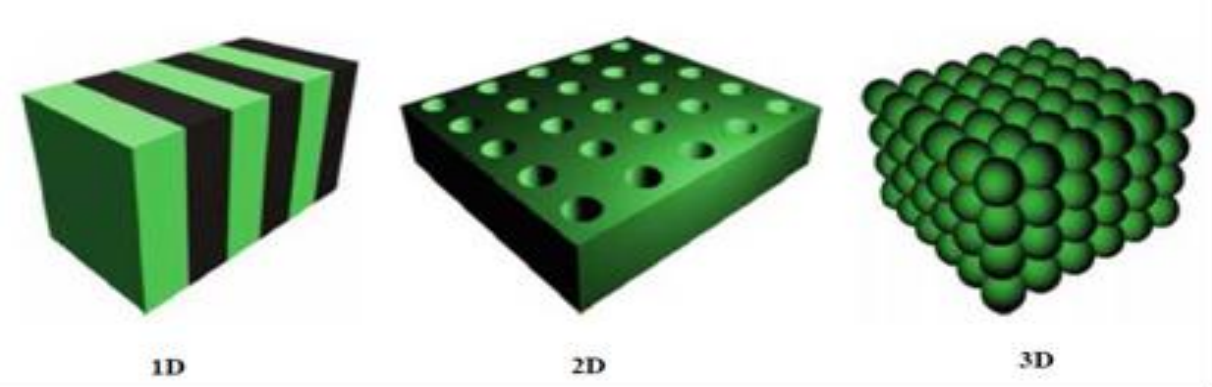


Figure II.5 : Cristaux photoniques à une, deux et trois dimensions [12].

II-4- Différents types des cristaux photoniques

II-4-1 Les cristaux photoniques unidimensionnels (réseau de Bragg)

Un cristal photonique unidimensionnel (1D) est composé de l'alternance périodique dans une seule direction de l'espace de deux milieux diélectriques de constantes diélectriques respectives$\varepsilon_1$etε_2. Miroir de Bragg constitué d'un cristal photonique à une dimension. Les bandes interdites ou « gap » de cette structure, appelée également miroir de Bragg, sont sensibles à l'angle d'incidence de l'onde. Ainsi pour obtenir un contrôle des bandes interdites quel que soit l'angle d'incidence, il faut étendre la périodicité de la structure à 2 ou 3 dimensions. Les structures 1D sont utilisées comme miroirs diélectriques filtres optiques [15].

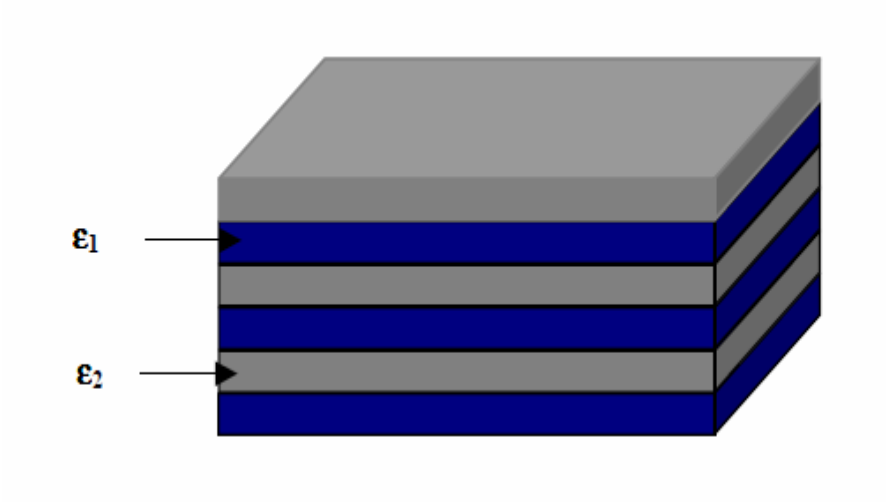


Figure II.6 : Schéma d'un miroir de Bragg constitué d'un milieu diélectrique périodique fini [15].

II-4-2 Cristaux photoniques bidimensionnelle 2D

La périodicité des miroirs de Bragg permet d'ouvrir une bande de fréquence interdite dans des directions proches de celle de l'empilement. Du point de vue de l'optique intégré, il serait très intéressant de pouvoir confiner la lumière dans les autres directions de l'espace. Pour se faire, les cristaux photoniques 2D et 3D ont été imaginés.

A deux dimensions, les cristaux photoniques sont composés d'un réseau périodique de piliers de diélectrique dans l'air ou de trous d'air percés dans un diélectrique. Les deux réseaux les plus courants pour l'organisation des piliers (ou des trous) sont le réseau carré et le réseau triangulaire [17].

II-4-3 Cristaux photoniques tridimensionnels 3D

La structure des cristaux photoniques tridimensionnels 3D permet d'avoir une bande interdite omnidirectionnelle, le premier cristal photonique a été conçu à base de sphères de silicium arrangées sur une structure diamant. Il existe un grand nombre de structure possible, Auguste

Bravais a établis un classement de différents familles de CP, il a montré qu'ils peuvent se répartir en sept types de maille (7ième cristallins) et 14 types de réseaux (réseaux de Bravais).

La figure II.7 : montre quelques types de structure de CP artificiel 3D [13].

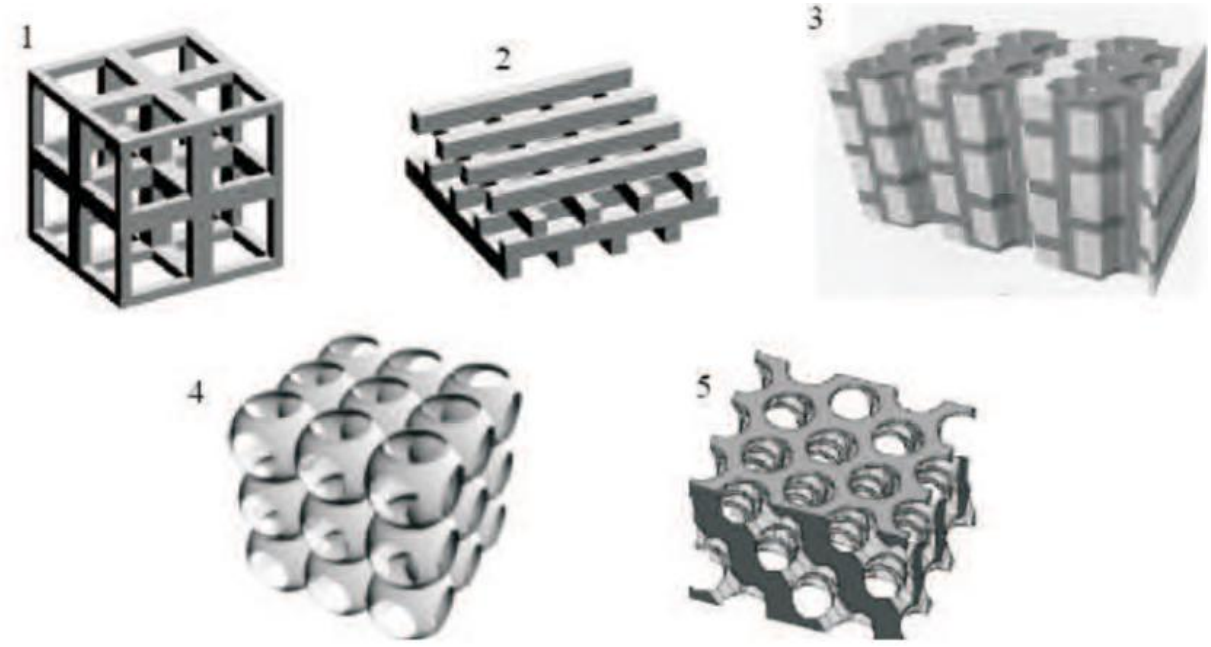


Figure II.7 : quelque type de CP 3D artificiel : (1) cubique, (2) tas de bois, (3) structure multicouches, (4) opales ou opales inversées et (5) Yablonivite [13].

- **Structure Tas de bois**

La structure tas de bois est obtenue en superposant des rubans de silicium polycristallin successivement par couches ; la silice sera enlevé à la fin pour obtenir un CP 3DSi/air dont le contraste est suffisant pour obtenir une bande interdite dans toute direction de l'espace (figure II.7(2)) [13].

Structure de l'opale

L'opale est obtenue chimiquement par auto-organisation. La première opale a été obtenue par sédimentation de sphères de silice en solution: par sédimentation ces sphères s'arrangent selon un réseau cubique à faces centrées. Le nombre important de défauts dans les premières opales a été fortement réduit grâce à des techniques de croissance auto organisées proposées par Y.A. Vlassov (Figure II.7). La plupart de ces cristaux colloïdaux ne présentent pas de bandes d'énergies interdites, à cause du faible contraste d'indice.

Cependant, ces structures servent d'empreinte pour la réalisation d'opales inverses à partir de l'infiltration d'un matériau de haut indice. Les sphères initiales sont ensuite dissoutes pour aboutir à la structure finale de sphères d'air dans une matrice de haut indice [13].

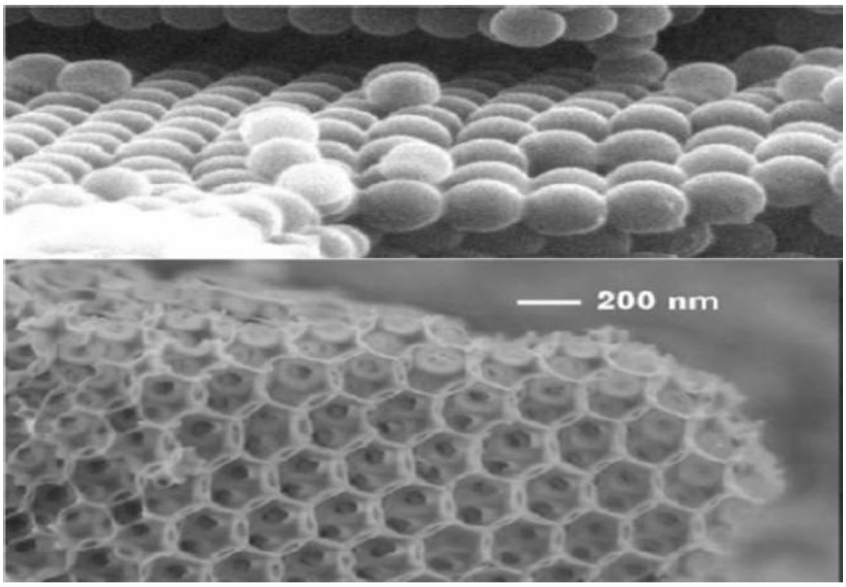


Figure II.8 : La structure de l'opale : en haut les opales directe, en bas les opales inverse [13].

II-5- Cristaux photoniques bidimensionnels 2D

Les structures périodiques bidimensionnelles, sont périodiques suivant deux directions de l'espace et infinies suivant la troisième. Ces structures périodiques sont composées de cylindres diélectriques. Elles présentent une relative simplicité géométrique qui facilite les études théoriques et expérimentales. Dans ces structures 2D, il existe deux polarisations possibles pour les ondes électromagnétiques. La polarisation électrique (TE) correspond au cas où le champ électrique E est parallèle aux barreaux de la structure considérée de longueur infinie, et la polarisation magnétique (TM) correspond lorsque le champ magnétique H est parallèle aux cylindres infinis.

Il existe deux types de structures périodiques diélectriques :

- Les structures dites « connectées » (Figure II-9) : les motifs élémentaires sont d'indicen1inférieur à l'indice n2de la matrice diélectrique.

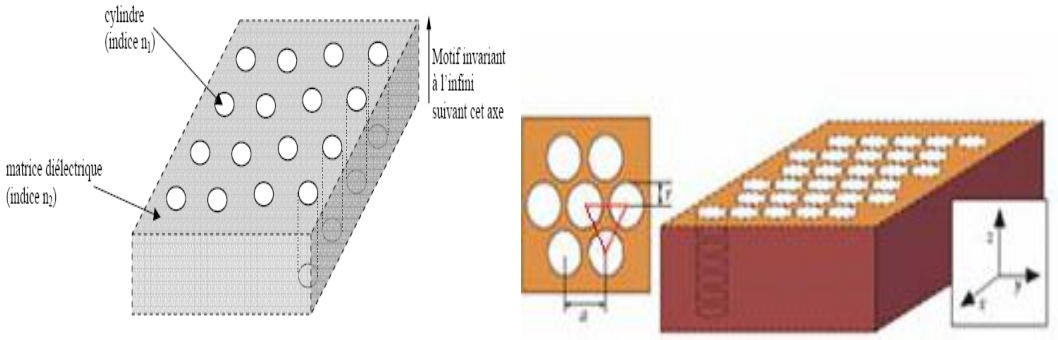


Figure II-9 : Cristal photonique bidimensionnel de trous d'air (connectée) [17].

Les structures dites « déconnectées » (Figure II-10) : les motifs élémentaires sont d'indice n1supérieur à l'indice n2de l'espace inter motifs. Elles sont constituées de tiges diélectriques alignées périodiquement dans l'air.

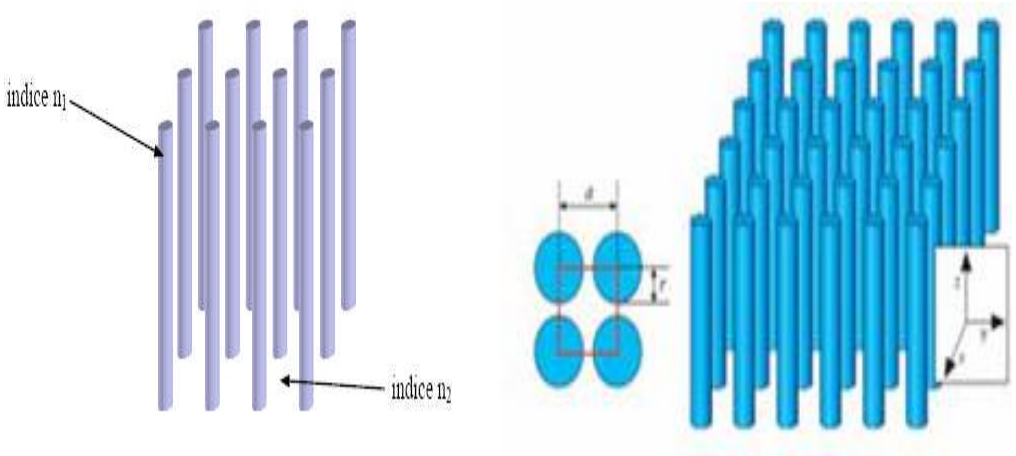


Figure II-10 : Cristal photonique bidimensionnel de tiges diélectriques (déconnectée) [17].

II-5-1 Différentes familles de cristaux photoniques bidimensionnels

Il existe plusieurs façons de réaliser des structures bidimensionnelles selon la répartition des trous qui les forment, divisée en trois familles, celle en réseau carré, triangulaire et hexagonale [15].

II-5-1-1 Le réseau carré

La répartition des trous dans le réseau carré forme un carré avec des nœuds distancés de <<a>>. Par ailleurs, il est difficile d'obtenir une bande interdite totale (une bande interdite qui empêche la propagation quelle que soit la polarisation) à cause de sa sensibilité à l'angle d'incidence et la polarisation électromagnétique. Les propriétés géométriques élémentaires pour ce réseau est défini dans le tableau suivant :

Vecteur directe (a_1, a_2)	a_1=(1,0) a_2=(0,1)
Vecteur réciproque (b_1, b_2)	$b_1 = \frac{2\pi}{a}(1,0)$ $b_2 = \frac{2\pi}{a}(0,1)$
Facteur de remplissage f	f=$\pi \frac{r^2}{a^2}$

Tableau II.1 : Caractéristiques géométriques d'un réseau carré [13]

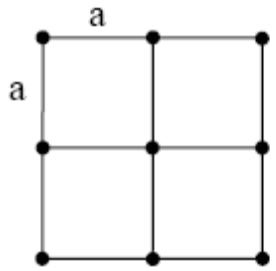


Figure II-11 : Le réseau carré

II-5-1-2 Le réseau triangulaire

Cette structure comme son nom l'indique est un réseau ou les mailles sont en forme de triangles symétriques équilatérales distancié de <<a>>. Contrairement au réseau carré le réseau triangulaire est moins sensible à l'angle d'incidence, tandis que c'est difficile d'obtenir une bande interdite totale. Un ensemble de réseau triangulaire peut mener à un réseau

Hexagonal. Les propriétés géométriques élémentaires pour ce réseau sont définies dans le tableau suivant :

Vecteur directe (a_1, a_2)	$a_1 = (1,0)$ $a_2 = (1/2\,, \sqrt{3}/2)$
Vecteur réciproque (b_1, b_2)	$b_1 = \frac{2\pi}{a}(1, -1/\sqrt{3})$ $b_2 = \frac{2\pi}{a}(0, 2/\sqrt{3})$
Facteur de remplissage f	f=$\pi \frac{r^2}{a^2}(\frac{2}{\sqrt{3}})$

Tableau II.2 : Caractéristiques géométriques d'un réseau triangulaire [13]

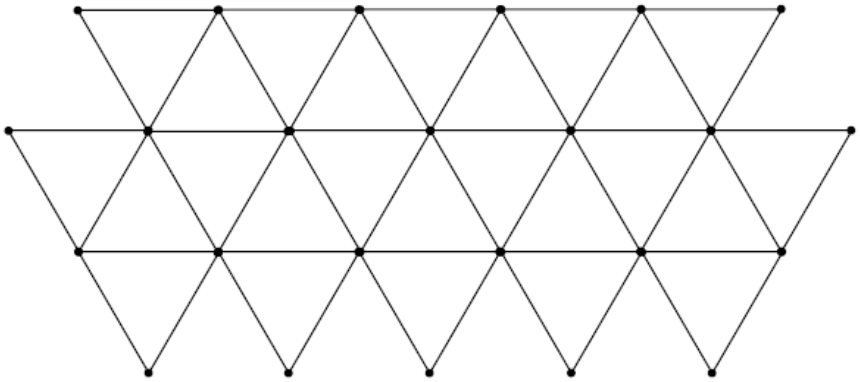


Figure II-12 : Le réseau triangulaire [16].

II-5-1-3 Le réseau hexagonal

Sur un réseau hexagonal, si tous les nœuds sont identiques et espacés de « a », alors on appelle cette structure « graphite » car elle est similaire à la structure cristalline du graphite. À la différence du réseau triangulaire, il s'agit d'un réseau à deux «atomes» par

maille. Le réseau réciproque est aussi un réseau hexagonal et la zone de Brillouin irréductible est la même que pour le réseau triangulaire avec les directions principales notées КГ et МГ. La possibilité d'une bande interdite complète avait été prédite pour la première fois dans le cas d'un réseau de tiges diélectriques cylindriques [14].

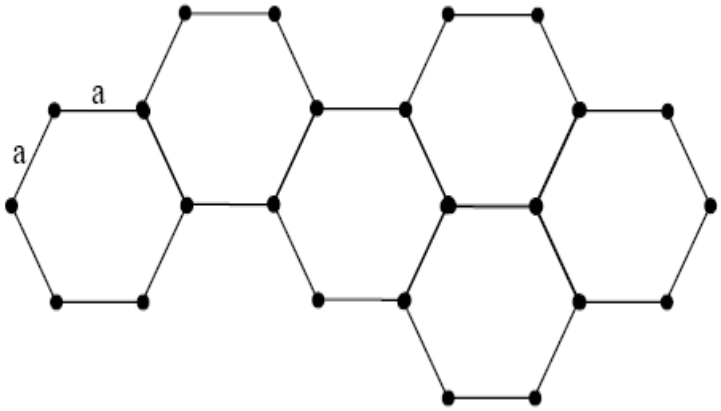


Figure II-13 : Structure hexagonale [16].

II-5-2 Paramètres du réseau

II-5-2-1 Réseaux direct et réciproque à deux dimensions

Les cristaux photoniques 2D planaires sont formés d'un réseau de trous d'air gravés dans une hétéro structure guidant. Les réseaux carrés et triangulaires sont les plus étudiés. Leurs propriétés dans l'espace réel et dans l'espace réciproque sont présentées sur la figure II-14. Le réseau triangulaire est généralement privilégié car il permet d'ouvrir les bandes interdites les plus larges.

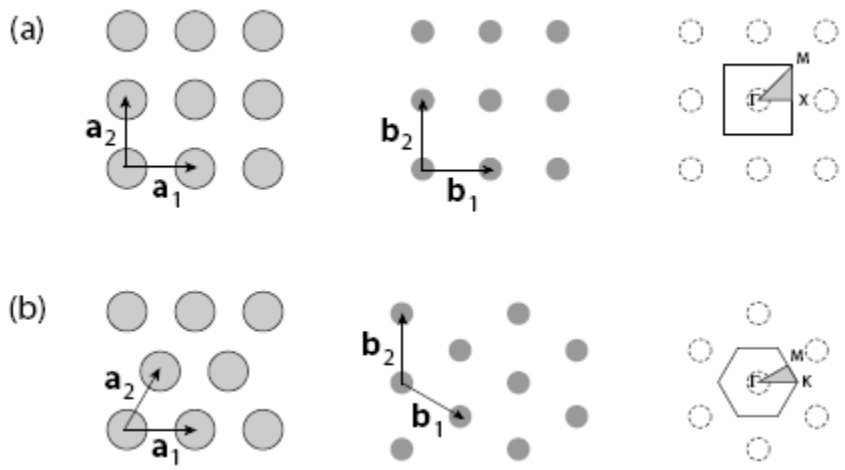


Figure II-14 : Réseau direct, réseau réciproque et zone de Brillouin avec les points de symétrie des deux réseaux les plus utilisés: (a) Réseau carré, (b) Réseau triangulaire [16].

II-5-2-2 Facteur de remplissage

Le facteur de remplissage pour un réseau bidimensionnel désigne le rapport entre l'aire du motif (ici un disque:$A = \pi r^2$, où r est le rayon du disque) et l'aire de la celluleélémentaire du réseau. Pour le réseau triangulaire l'aire de la cellule élémentaire est

$A_c = \frac{\sqrt{3}}{2} a^2$ (Où a est le paramètre de maille).

Le facteur de remplissage est alors:

$$f_{Triangulaire} = \frac{A}{A_C} = \frac{\pi . r^2}{\frac{\sqrt{3}}{2} a^2} = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{r}{a}\right)^2 \qquad \text{(II.1)}$$

Pour le réseau carré l'aire de la cellule élémentaire est$A_c = a^2$. Le facteur de remplissage est alors [16]

$$f_{Carré} = \pi \left(\frac{r}{a}\right)^2 \qquad \text{(II.2)}$$

II-5-3-Domaines d'application des cristaux photoniques 2D

Les applications des CP 2D sont nombreuses, beaucoup plus portés au intérêt aux domaines des télécommunications en utilisant des fréquences optiques mais aussi adaptées au domaine des micro-ondes tels que les antennes.

II-5-3-1 Fréquence optique

a) Les micro-résonateurs

Les guides d'ondes comme les micro-résonateurs sont obtenus en incluent des défauts ponctuelles linéairement répartie dans la structure à cristaux photoniques qu'on appelle a défaut ponctuel linéaire ou avec virage qu'on appelle guide coudé. Les premières études sur les micros résonateurs avec des structures bidimensionnelles ont été réalisées en 1997 par La billoy. Les guides d'onde : l'idée de réaliser les guides d'onde est apparue en 1994 et les premières réalisations sont arrivées en 1999. Les guides linéiques présentent beaucoup de pertes.

b) Filtres et multiplexeurs

Pour multiplexer plusieurs sources on fait varier les longueurs d'ondes émises afin de pourvoir les extraire à la sortie. Le multiplexeur en longueur d'ondes en anglais Wave lenght Division Multuplexing d'où les initiales WDM sont fabriqué à base de cristaux photoniques. On trouve ce genre de réalisation dans les liaisons entre les entreprises, ou dans les grandes artères sur des longues distances dans les liaisons internationales qui passent sous la mer ; il existe deux types de multiplexeurs, le CWDM pour les écarts de longueur d'ondes de 20nmou DWDM pour les écarts plus faibles.

c) Les fibres optiques

La fibre à base de cristaux photoniques appelé aussi fibre micro-structurées, fibres à trous, fibre à bandes interdites photoniques ou encore fibre PCF (photonic crystal fibers) à été une révolution de la fibre optique normale basée sur la réalisation d'un arrangement périodique de trous d'air autour d'un cœur de silice (figure II.15). Cette fibre était approuvée théoriquement en 1987 et conçue par le groupe d'Optoélectronique de l'Université de Bathqu'en1996.

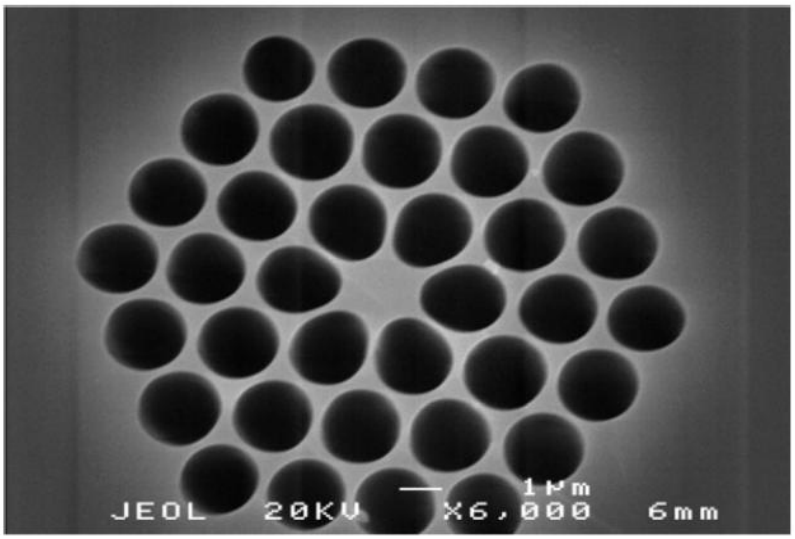


Figure II.15 : Section d'une fibre microstructure (MOF) [13].

Les caractéristiques qui distinguent la fibre PCF sont nombreuses parmi eux, on trouve :

- Permet un seuil de puissance élevé pour les non-linéarités de fibre.
- Puissance de crête élevée du mode de guidage avant dépassement du seuil de rupture des matériaux.
- Accès aisé pour le remplissage du cœur ou du gainage (gaz ou liquides).
- Réflexion de Fresnel réduite à partir de la surface de la fibre
- Vaste plage de valeurs de dispersion disponible (fortement négative à fortement positive)
- Fibres quasiment insensibles à la courbure y compris après enroulement sur des bobines de diamètre inférieur au centimètre.

II-5-3-2 Fréquences micro-ondes

Les premières expériences visant à exploiter les cristaux photoniques diélectriques comme substrat d'antennes ont été menées par E.R. Brown et al. Ainsi les cristaux photoniques 2D sont aussi utilisés dans la réalisation des circuits micro-ondes tels que les filtres planaires, les guides, les multiplexeurs. Ils sont aussi utilisés pour l'amélioration du rendement des antennes par utilisation des substrats à base des cristaux photoniques ultra réfractifs. Les BIPs peuvent être utilisés pour améliorer la directivité des antennes pour les surfaces à haute impédance [13].

II-5-3-3 Etat de l'art de la photonique pour le photovoltaïque

L'émergence des cellules en couche mince, et les limitations optiques qui y sont associées, ont fait de la (nano) photonique une boite à outil incontournable pour la réalisation de dispositifs à haut rendement. Bien que son application aux cellules solaires PV soit relativement récente, les concepts mis en jeu sont majoritairement une adaptation d'effets déjà utilisés pour d'autres composants opto-électroniques tels que les photo-détecteurs, les diodes électroluminescentes ou les lasers.

Le développement accéléré des moyens de simulation numérique et de fabrication de nanostructures a constitué un creuset favorable pour de telles études, ce qui a donné lieu à une littérature prolifique. En conséquence, il est impossible de décrire de manière exhaustive l'ensemble de ces études. Dans la suite, nous nous concentrerons donc sur les configurations ou les effets principaux exploités afin de conceptualiser le travail présenté dans ce manuscrit.

Les effets d'anti-reflet n'interviennent pas dans le piégeage de la lumière mais peuvent être une conséquence de la nano-structuration et sont à ce titre détaillés en début de section [1].

II-6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions de bases associées aux cristaux photoniques. Ces matériaux, dont la constante diélectrique varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde, sur une ou plusieurs directions de l'espace.

On s'est intéressé à une famille des cristaux photoniques : les cristaux photoniques à deux dimensions, on députant par l'étude de la propagation de la lumière dans ces cristaux suivant les deux polarisations.

CHAPITRE III

PRESENTATION DU LOGICIEL RSOFT CAD

III-1 Introduction

Les cristaux photoniques à structure périodique semblent très prometteurs puisqu'ils permettent une amélioration des performances de nombreux systèmes existants (fibre optique, antennes).

Dans ce chapitre on va présenter le logiciel Rsoft CAD et en particulier le module DiffractMOD. Le développement de méthode de modélisation optique précise et rapide reste donc primordial pour l'étude de ces structures [12]. La méthode étudier dans ce module est la méthode de RCWA (*Rigorous Coupled Wave Analysis*), nous avons appliqué cette méthode à des structures à base de cristaux photoniques bidimensionnels gravés dans des empilements de couches minces.

III-2 Présentation du logiciel Rsoft CAD

III-2-1 Environnement de CAD

Le RSoft CAD est un programme de base de RSoft Photonique, il permet aux chercheurs et ingénieurs de créer des systèmes pour la conception des différents dispositifs tels que : des guide d'ondes, des cavités résonantes, des circuits optiques et d'autres dispositifs photoniques. Cette logiciel calcule la réflexion, l'absorption et l'efficacité de transmittance de diffraction à tout ordre de diffraction sous la forme d'un la réflexion ou la transmittance de spectre.

Comme la dernière addition à la suite de conception de niveau du composant de la Rsoft, qui comprend également BeamPROP, FullWave, BandSOLVE, GratingMOD et Laser MOD, DiffractMOD partage également la même interface de mise en page Rsoft photonique CAD que les autres outils de composants. L'interface de CAD conviviale permet la définition précise d'un profil arbitraire sans limites associées à une approximation par morceaux. Résultats optimisés peuvent être trouvés rapidement le processus de conception et de modélisation est entièrement paramétrable permettant des simulations de lots. Un avantage important d'une interface de CAD partagée est qu'une fois que les concepteurs de créer et d'analyser la structure de diffraction dans DiffractMOD, la même disposition de conception peut être directement simulé en double alternance et BandSOLVE pour d'autres aspects de la même structure - comme réponse dans le domaine temporel avec finie temps de différence de méthode de domaine ou l'analyse de structure de bande avec la méthode d'extension d'onde

plane. DiffractMOD peut aussi être facilement utilisé avec BeamPROP, BandSOLVE, double alternance et GratingMOD pour la simulation hybride d'un module à composants multiples

III-2-2 le simulateur « DiffractMOD»

DiffractMOD est un outil de conception et de simulation pour les structures optiques diffractifs tels que des éléments de diffraction optiques, structures périodiques, et des cristaux photoniques de bande interdite. Il est basé sur la technique couplée analyse rigoureuse de la vague (RCWA) qui a été mis en œuvre en utilisant des algorithmes avancés, y compris la factorisation de Fourier rapide et généralisée formulation de ligne de transmission. Déjà leader du marché, l'outil a des applications étendues dans un large éventail de domaines, y compris la fabrication de semi-conducteurs et l'optique ondulatoire. La méthode RCWA utilise le concept d'une cellule de l'unité pour gérer des structures périodiques à la fois en 2D et 3D, et est spécialement conçu pour les structures multicouches [18].

III-3- Méthode de modélisation

Il existe de nombreuses méthodes numériques permettant de résoudre les équations de Maxwell. Ces méthodes peuvent être classées suivant différents critères, comme le domaine dans lequel elles opèrent, temporel ou fréquentiel, ou encore le nombre de dimensions de l'espace qu'elles discrétisent. Par exemple, la méthode FDTD (Finite Difference Time Domain), une des méthodes numériques les plus répandues, opère dans le domaine temporel en discrétisant les trois directions de l'espace.

La méthode numérique utilisée dans ce travail est une méthode modale fréquentielle utilisant une discrétisation bidimensionnelle (2D) suivie d'une intégration analytique dans la troisième direction, cette méthode est la méthode modale de Fourier, dite aussi *Rigorous Coupled Wave Analysis* (RCWA) bien connue et très utilisée pour le calcul de la diffraction et l'absorption par des objets périodiques.

III-3-1 Méthode modale de Fourier (RCWA)

La méthode modale de Fourier permet de résoudre le problème de la diffraction par une structure périodique en calculant les modes de la structure et leurs échanges d'énergie aux interfaces. Les modes sont calculés en développant en série de Fourier le champ électromagnétique ainsi que la permittivité et la perméabilité de la structure. Cette méthode, qui porte également dans la littérature le nom de RCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis),

a été développée initialement vers la n des années 70 pour l'analyse électromagnétique des réseaux de diffraction. Parallèlement, elle a été utilisée dans le domaine des cristaux photoniques pour le calcul des diagrammes de bande, sous le nom de méthode des ondes planes. Cette méthode peut être généralisée au calcul de la diffraction. Cette extension du domaine d'application de la méthode est basée sur une périodisation de l'objet couplée à l'utilisation de couches absorbantes

Pour exposer les grandes lignes de la méthode modale de Fourier, nous considérons la diffraction par le réseau unidimensionnel (1D) multicouches du cas plus général d'un réseau 2D n'apporte pas de di-cultes supplémentaires autres que des di-cultes d'ordre calculatoire [19].

III-4 Les étapes de simulation

La fenêtre de programme de Rsoft CAD comporte une barre de menus en haut de la fenêtre, une barre des outils qui porte plusieurs icônes et la ligne d'état (voir figure. III.1)

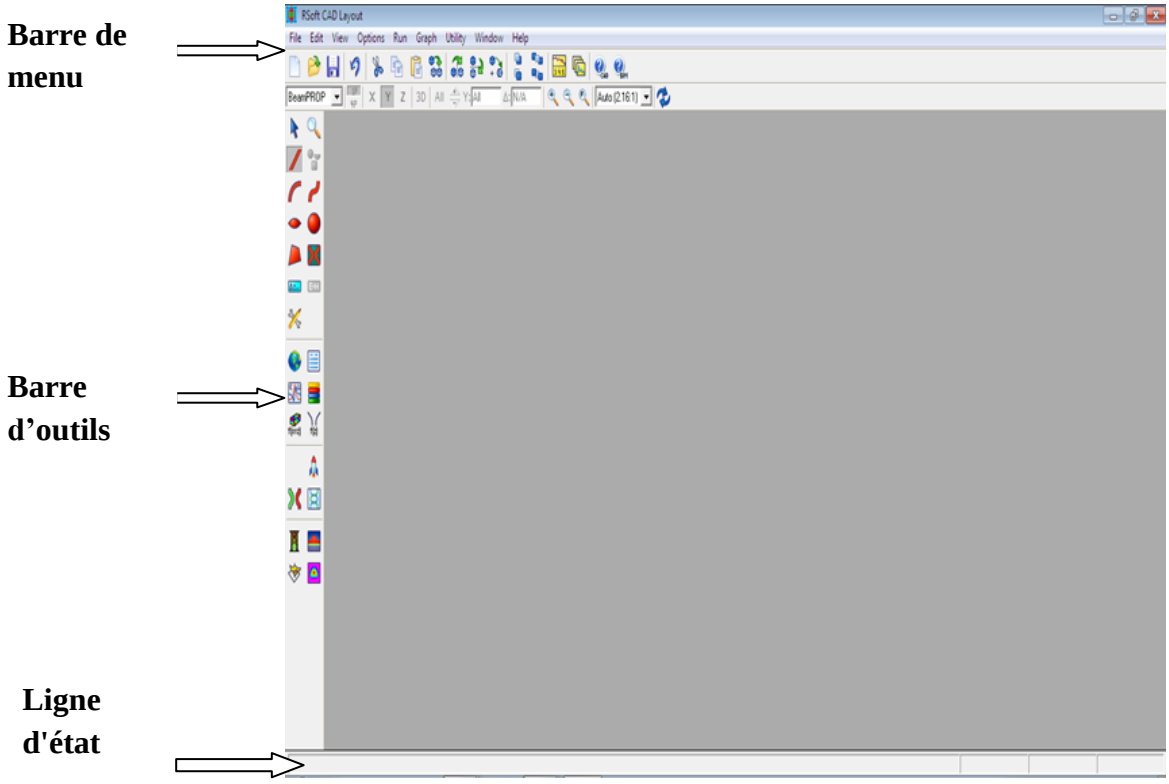


Figure.III.1: Fenêtre principale du programme CAD [18].

Les menus permettent l'accès au divers dossier standard et les opérations d'édition. La ligne d'état fournit des informations sur le mode courant de disposition, avec l'affichage du même rang pendant le dessin

III-4-1 Création d'un nouveau circuit

Pour créer un nouveau circuit on va cliquer sur l'icône New circuit  dans la barre d'outils supérieur. Alternativement, nous allons choisir **File /New** du menu. Le dialogue de démarrage de la figure III. 1 va apparaître figure.III.2 [18].

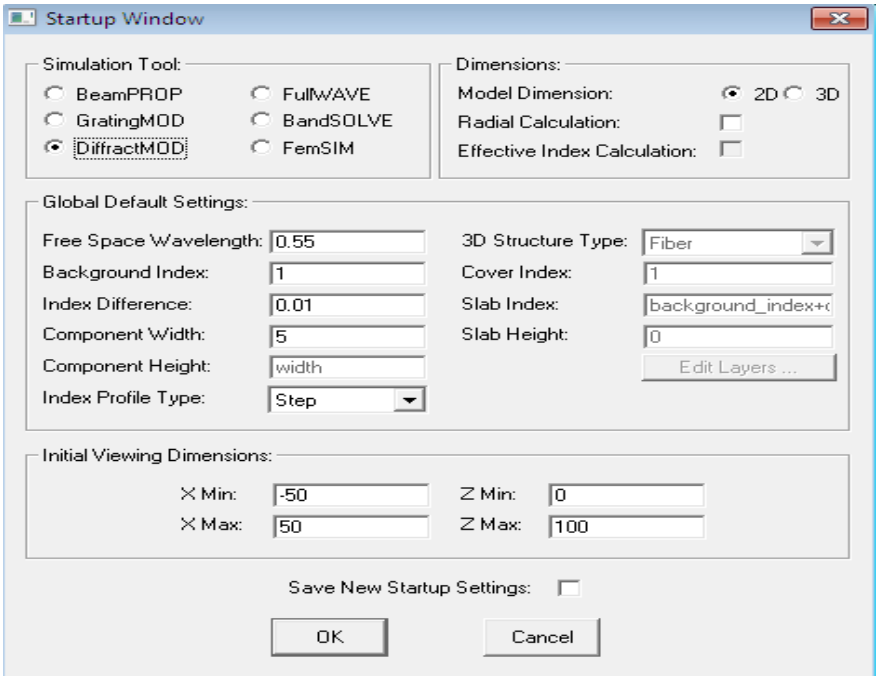


Figure III.2 La fenêtre de démarrage (startup Window).

Il faut remplir la différence d'indice (Index différence), qui est la différence d'indice par défaut entre la couche guidant et l'indice de substrat (Background index), d'autre part, il faut choisir le type de la polarisation (Mode TE ou Mode TM). On peut aussi par cette option choisir le module de simulation parmi les six modules existants dans le logiciel RSoft bandSOLVE, FullWave, BeamPROP/BPM ou GratingMOD. Après l'introduction des informations dans la fenêtre de démarrage on va cliquer sur OK pour obtenir la fenêtre de la figure III.3 [18].

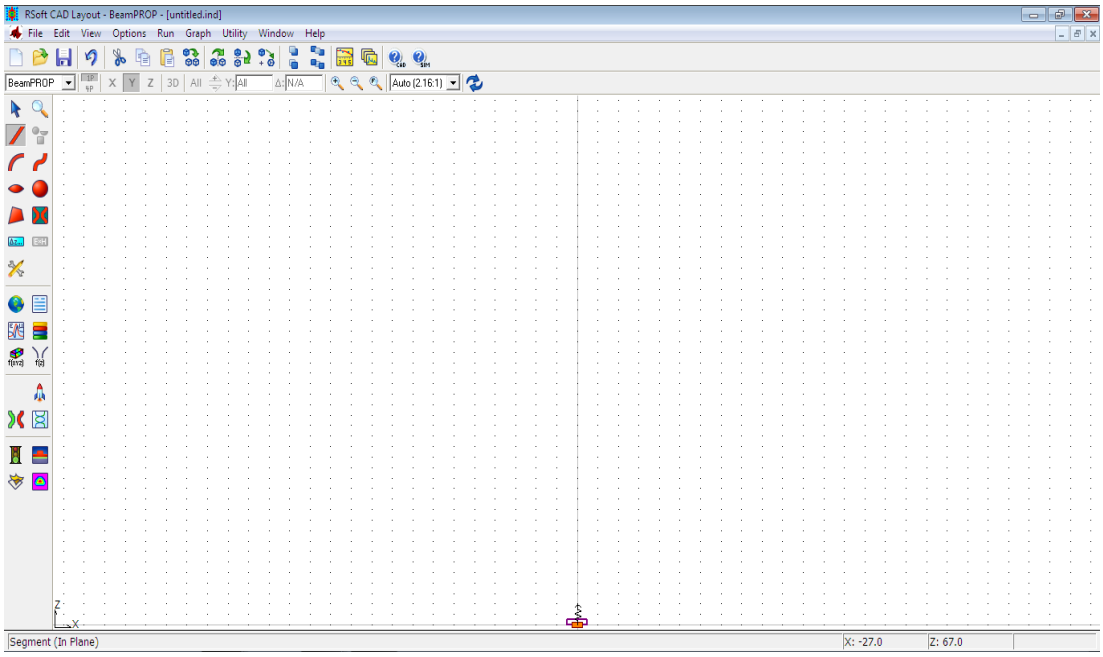


Figure III.3: Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit.

III-4-2 Création de la structure dans le CAD Rsoft

Pour créer le composant diffractif, il suffit de tracer un segment dans l'interface de CAD en déplaçant la souris vers la recherché position de départ, appuyer et maintenir le bouton gauche de la souris, déplacer la souris à la position de fin souhaitée, et en appuyant sur le bouton de la souris. Dans cet exemple, nous n'utiliserons un segment à créer la structure. Bien sûr, plus des structures complexes peuvent être réalisées grâce à l'utilisation de segments supplémentaires.

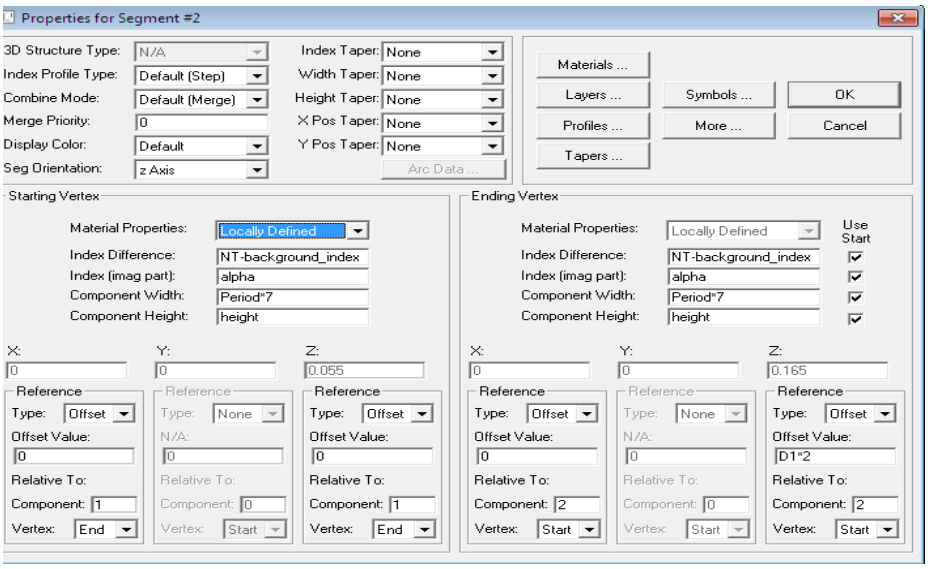


Figure III.4 : Propriétés sectoriels pour l'objet de guide d'ondes créé.

Après l'introduction des différentes données (type de réseau, forme de motif, le nombre de rangés et le nom du circuit) on clique sur le bouton OK pour obtenir la structure du cristal photonique qui apparaît sur la figure III.5.

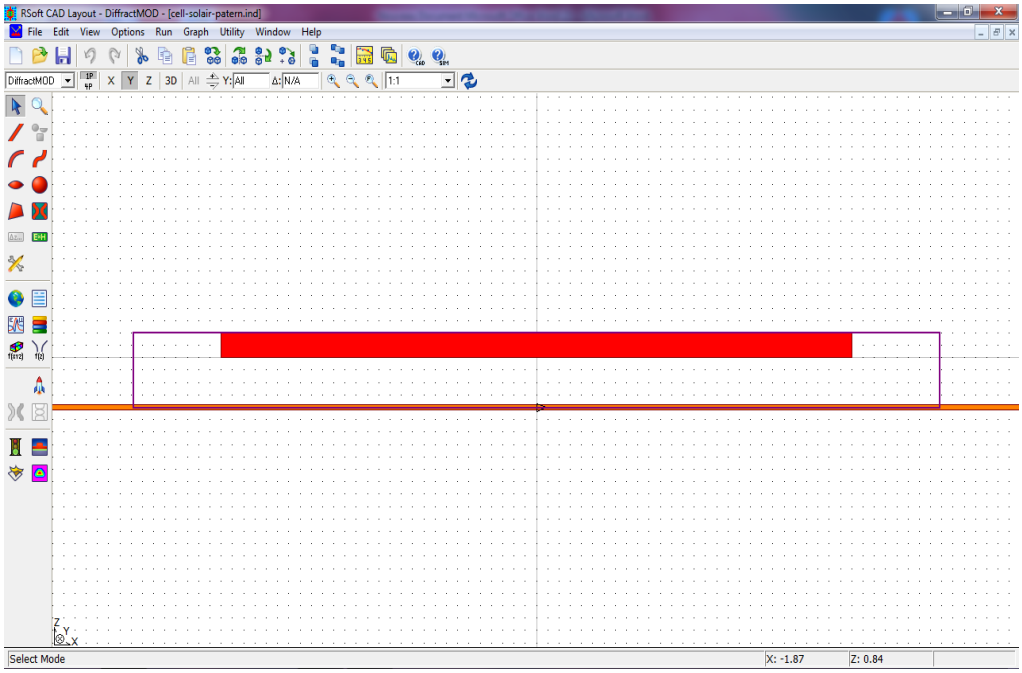


Figure III.5: Disposition de configuration nom structure.

III-4-3 Définition des variables

Cliquer sur l'icône  (Edit symboles) dans la fenêtre de CAD, le tableau de symbole (Table editor) s'ouvre (Figure III.6). Ce tableau de symboles permet à l'utilisateur de créer ou modifier à la fois et intégrer les variables définies par l'utilisateur, ces variables peuvent être utilisées pour définir pratiquement n'importe quel paramètre de la structure (le rayon, la période, l'indice de réfraction, nombre de rangés).

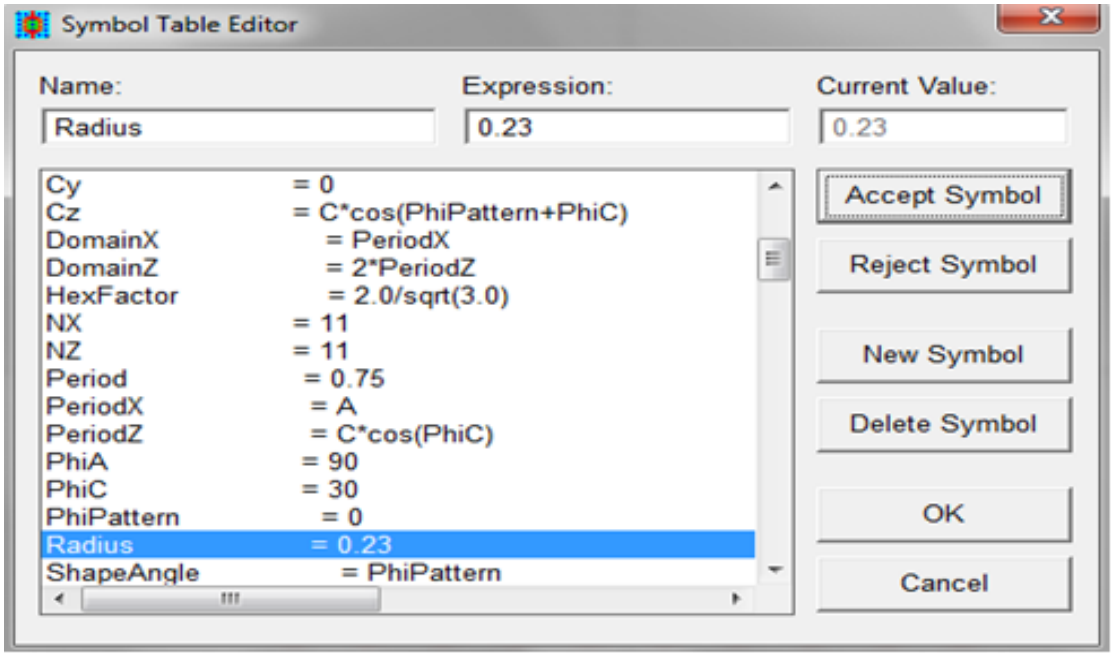


Figure III.6: L'éditeur du Tableau de symboles.

Ces symboles correspondent aux arrangements faits dans le nouveau circuit (New Circuit) de la boite de dialogue ci-dessus. Pour définir un nouveau symbole (par exemple Nhole=1), on clique sur new symbole puis en va entrer le nom et la valeur du symbole

III-4-4 Vérification de la structure

Pour vérifier notre structure, nous avons simulé le profil de la constante diélectrique dans le plan de périodicité (plan XZ).

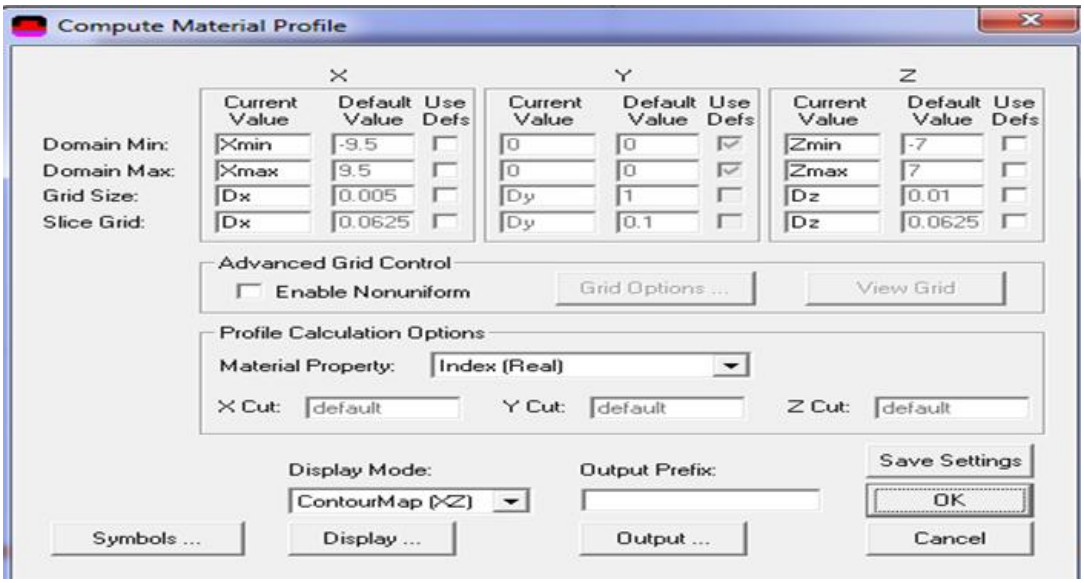


Figure III.7 : Arrangements de calcul de profil d'index.

Appuyez sur OK pour afficher le profil d'indice comme le montre la figureIII.8.

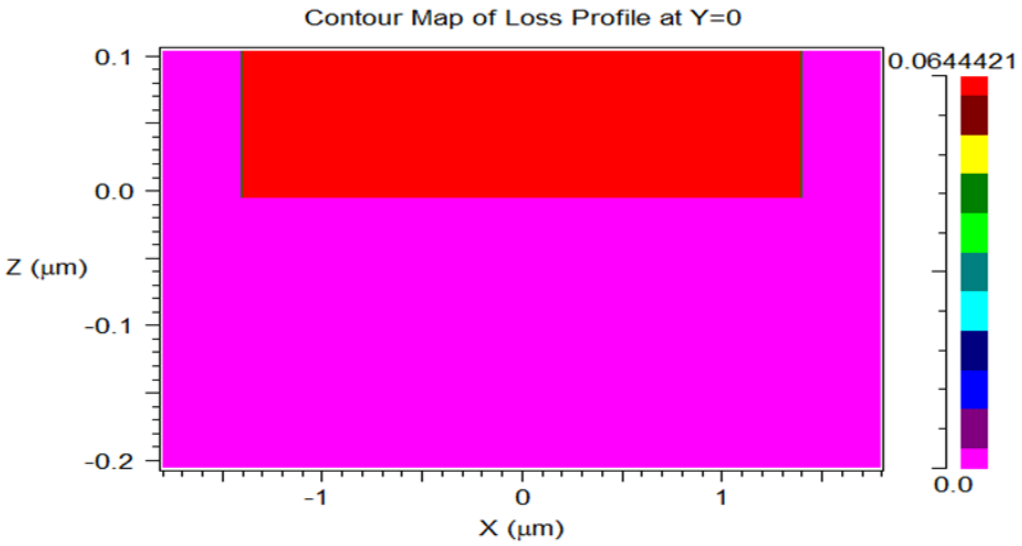


Figure III.8: Distributiond'index pour la configuration nom structure (référence)**.**

Maintenant que nous avons créé la structure, nous pouvons définir les paramètres de simulation. Appuyez sur la simulation icône Effectuez (**Perform simulation**) à ouvrir la boîte de dialogue Paramètres de simulation DiffractMOD le montre la figure III.9 [18].

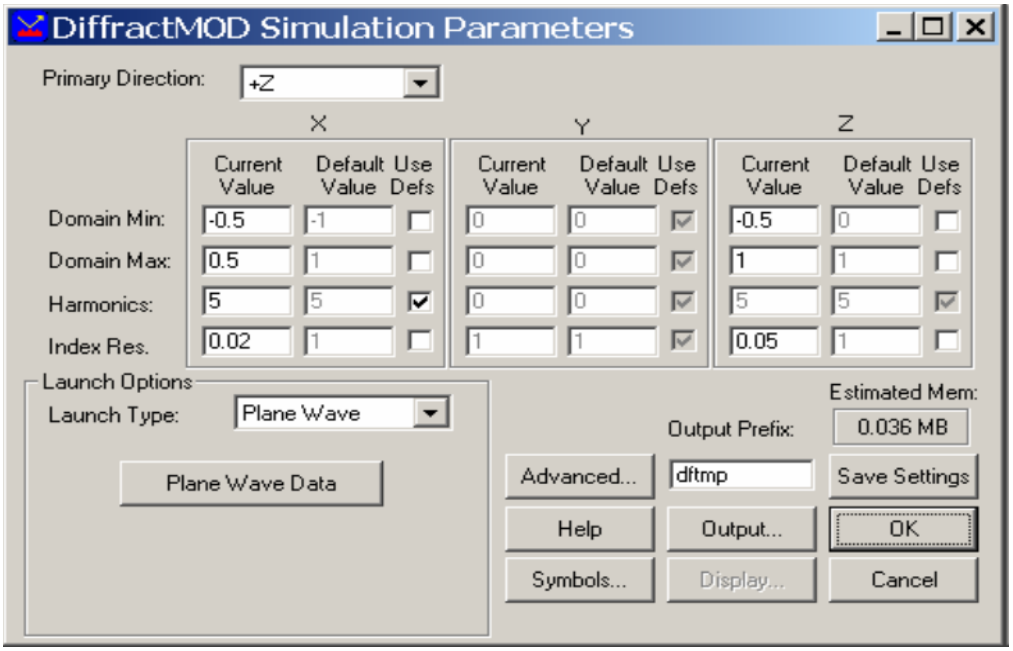


Figure III.9: La boîte de dialogue Paramètres de simulation DiffractMOD où les paramètres de simulation sont contrôlé [18].

Dans cette fenêtre, nous pouvons mettre en place tous les paramètres de simulation primaires tels que l'angle de lancement et nombre d'harmoniques être utilisé. Cependant, puisque c'est un cas simple, nous utiliserons toutes les valeurs par défaut. Toutes les options de simulation seront discutées en détail dans les sections suivantes [18].

III-4-5 Configuration du paramètre simulé (Réflexion, transmittance, absorption)

Appuyez sur le bouton de **Output** pour ouvrir la boîte de dialogue Options de sortie (Output) où l'on peut sélectionner le type (s) de la production nous voulons produire. Définir le type de tracé à vs longueur d'onde, le Min, Max, et les valeurs Step à 0,7, 1,5 et 0,001. Sélectionnez le Totale normalisé puissance réfléchie et le total transmis normalisés options d'alimentation. Appuyez sur OK pour revenir à la DiffractMOD dialogue Paramètres de simulation [18].

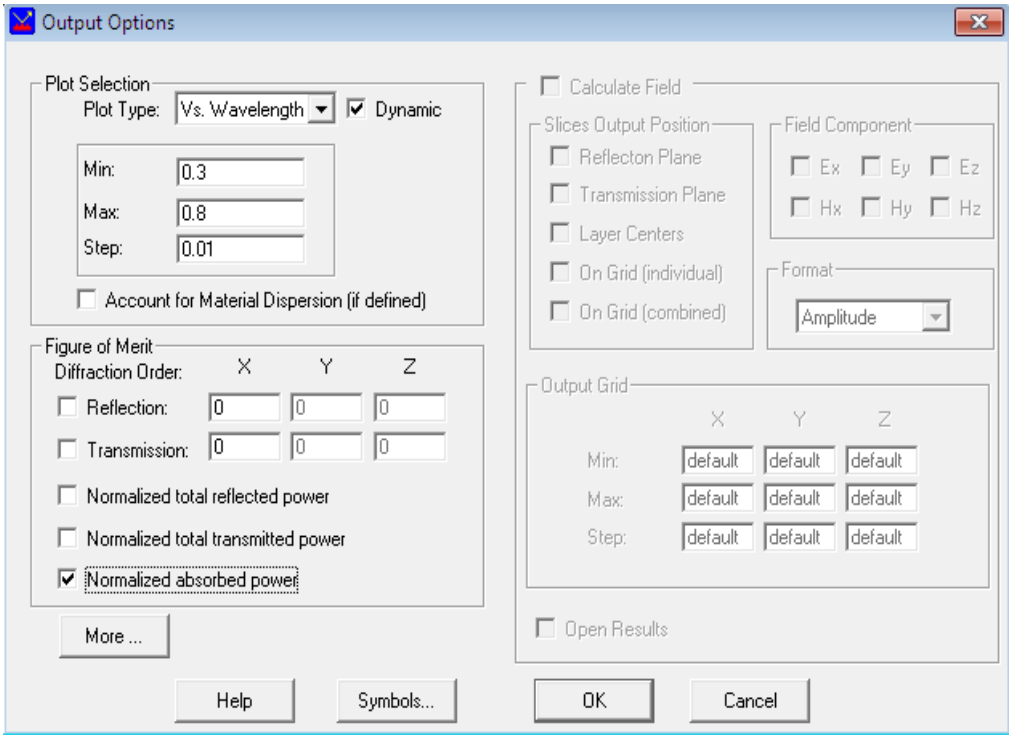


Figure III.10: Output Options.

III-4-6 L'exécution de la simulation

Appuyez sur le bouton OK pour lancer la simulation. Après la simulation est terminée, le résultat se affiche comme indiqué dans Figure III.10.

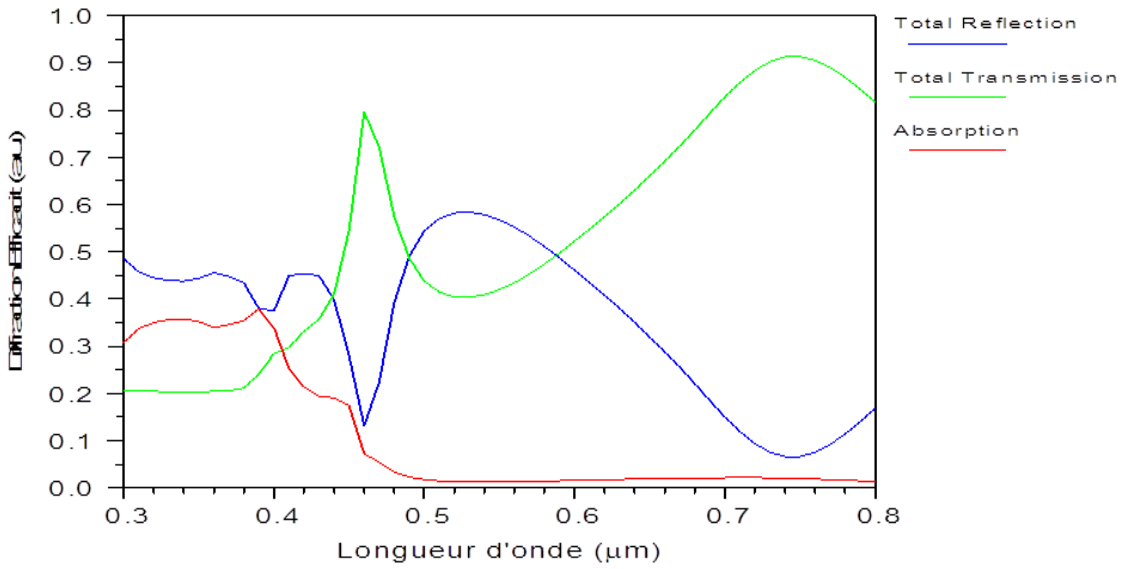


Figure III.11: Résultats de la simulation.

III-4-7 La lecture des résultats

Afin de regarder ou imprimer les résultats de simulation, on clique sur l'icône de WinPLOT dans la barre des outils supérieur de la fenêtre de CAD, et on choisit le graphe désiré à partir du dialogue qui est présenté.

III-5 Autres options de Rsoft CAD

Edit Launch Field (Editer Le Champ De Lancement) : Cette option ouvre la boite de dialogue de **LaunchParameters** (paramètres de lancement) où l'utilisateur peut indiques le champ initial pour une simulation.

Edit layer table (Editer Le Tableau De Couche) : Cette option ouvre **layer table Editor** (l'éditeur), il est utilisé pour définir les structures **3D** multicouche (multilayer).

Perform Simulation (Effectuer La Simulation) : Cette option ouvre la boite de dialogue de Simulation Paramètre (paramètres de simulation) où l'utilisateur peut indique des paramètres de simulation avant de l'effectuer.

Edit Global Settings (Editer Les Arrangements Globaux**) :** Cette option ouvre la boite de dialogue de Global Settings (globale d'arrangements) où les arrangements par défaut du circuit peuvent être placés. Elle est équivalente à la nouvelle boite de dialogue de circuit.

**Launch DataBrowser :** Ces option ouvrent le Rsoft Data Browser.

Edit Pathways (Editer Les Voies) : Cette option permet à l'utilisateur de définir des pathways, qui sont utilisés pour définir des positions de lancement pour l'analyse.

III-6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce Chapitre logiciel RsoftCAD, avec le simulateur DiffractMOD, les grandes lignes de la méthode numérique qui a été utilisée dans ce travail et les étapes de simulation. Cette méthode originale est basée sur la méthode modale de Fourier (RCWA) et utilise des couches absorbantes de type. L'intérêt de généraliser ainsi la méthode modale de Fourier est de pouvoir disposer d'une méthode numérique stable et e-cace pour traiter des problèmes de diffraction non-périodiques.

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV-1 Introduction

La structure périodique des matériaux à l'échelle de dimensions avoisinant les longueurs d'ondes des photons (cristaux photoniques) a permis la réalisation de milieux pouvant interdire la propagation de la lumière dans des bandes entières de fréquences (bandes interdites photoniques ou BIP).

Parmi ces méthodes de plus il existe plusieurs simulateurs qui ont été conçus pour faciliter cette tache comme le f2p, le MIT Photonic-Bands, FIMMWAVE–FIMMPROP et Rsoft CAD de modélisation on peut citer la méthode couplée analyse rigoureuse de la vague (RCWA).

Cette partie sera consacrée à l'étude des spectres d'absorption dans une couche non structurée et structurée (cristaux photoniques bidimensionnels (CPs)) pour différent matériaux tel que Si et a-Si :H pour différentes configurations. L'absorption pour plusieurs configurations sont alors calculés en fonction des variations des paramètres physique (l'indice de réfraction « n ») et les paramètres géométriques tel que : le facteur de remplissage « ff », la période du réseau « L » et nombre des couches « N » nous avons utilisé au cours de ce chapitre le logiciel de simulation DiffractMOD de RsoftCAD.

La méthode modale de Fourier est particulièrement bien adaptée pour traiter la propagation d'une onde électromagnétique arrivant sur un milieu périodique telqu'un cristal photonique. La Figure IV.1 illustre l'équivalent d'un CP membranaire pour une simulation basée sur la RCWA.

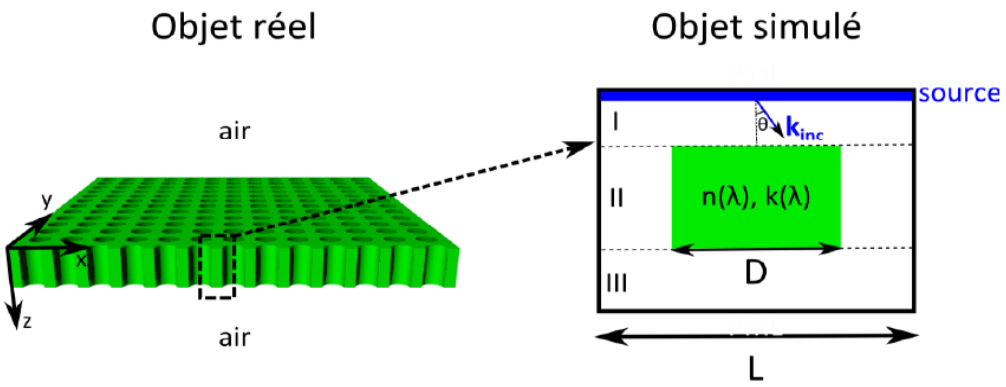


Figure IV.1 : Description et paramétrage d'un CP membranaire en RCWA. Dans notre cas, la source envoie des ondes planes.

IV-2 Caractérisation optique des échantillons intégrant un CP

L'objectif de cette partie est d'introduire les propriétés optiques des CP membranaire absorbants, d'étudier leurs spectres d'absorption et de mettre en évidence les différents phénomènes physiques mis en jeu ainsi que les propriétés modales exploitées.

IV-2-1 Loi d'absorption de la lumière - loi de Beer-Lambert

Soit une lumière monochromatique traversant une solution absorbante de concentration C contenue dans une cuve d'épaisseur l.

.

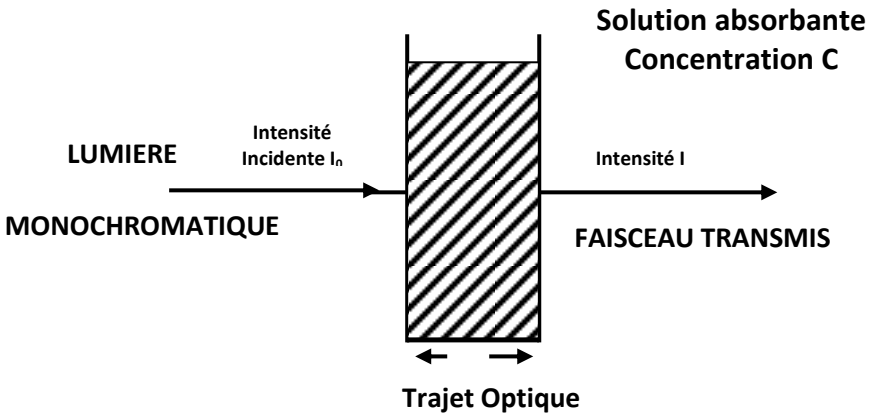


Figure IV.2 une lumière monochromatiques traversant une solution absorbante de concentration C contenue dans une cuve d'épaisseur l [20].

Une partie de ce rayonnement sera absorbée par l'échantillon et une partie sera transmise. Bouguer, Lambert et Beer ont étudié les relations qui existent entre I_0 et I : l'intensité d'une lumière monochromatique traversant un milieu où elle est absorbée décroît de façon exponentielle : $$\boldsymbol{I = I_0 e^{-klC}}$$

- I_0 est l'intensité de la lumière incidente
- I est l'intensité après passage à travers la cuve contenant la solution (intensité transmise)
- l est la distance traversée par la lumière (épaisseur de la cuve) (en cm)
- C est la concentration des espèces absorbantes
- k est une constante caractéristique de l'échantillon.

Cette équation peut se réécrire $\boldsymbol{\log(I_0/I) = klC/2.3 = \varepsilon lC}$

- $\boldsymbol{\log(I_0/I)}$ est appelé **absorbance (A).**
- $\boldsymbol{I/I_0 = T}$ est la **transmission**.

- **% T** est la **transmission.**
- **ε** est le coefficient d'extinction molaire ; c'est une caractéristique de la substance étudiée à une longueur d'onde donnée. Si **C** est la molarité, **ε** est en L. $mol^{-1}.cm^{-1}$ [20].

On obtient alors la relation connue sous le nom de loi de Beer-Lambert

$$\mathbf{A_\lambda = \log T_\lambda = \varepsilon l C}$$

$$\mathbf{A_\lambda = 1 - R_\lambda - T_\lambda}$$

$$\mathbf{D = ff \times L}$$ [21]

IV-2-2 Design optique d'une cellule solaire intégrant un CP membranaire absorbant

Dans cette partie, nous introduisons l'empilement de couches constituant nos cellules solaires en justifiant le choix des matériaux retenus et l'épaisseur des couches. Les propriétés optiques de la cellule « photonisée » seront ensuite discutées notamment à l'aide de spectres d'absorption.

L'empilement de base considéré se compose, de la face arrière à la face avant de la cellule, d'une couche d'argent (Ag), d'une couche d'oxyde de zinc (ZnO), de la couche active en silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) et finalement d'une autre couche d'oxyde conducteur transparent (TCO en anglais) en oxyde d'indium dopé à l'étain (In2O3-SnO2, ITO). Un réseau carré de trou est ensuite formé dans la couche d'ITO et dans la couche active pour former la cellule solaire « photonisée » représentée sur la Figure IV.3.

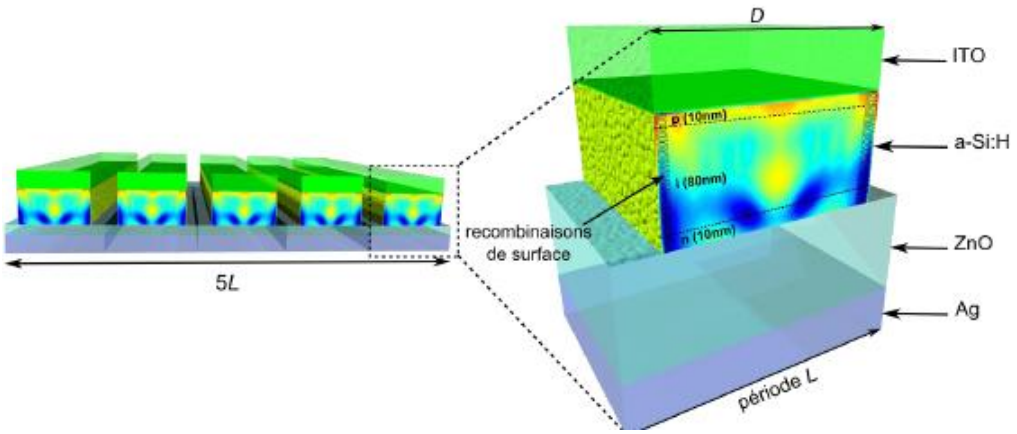


Figure IV.3: Design de la cellule solaire étudiée avec ses principaux paramètres géométriques. Un CP1D à réseau carré est gravé dans la couche d'ITO et dans la couche active. Les paires e^--h+ générées dans le a-Si :H sont collectées via les couches TCO environnantes. [1].

Nous verrons plus loin que dans cette configuration, la lumière incidente est absorbée préférentiellement dans la couche active. Les épaisseurs des couches résultent d'un compromis entre les propriétés électriques et optiques de la cellule, entre autres. Ainsi, la couche d'ITO possède une épaisseur de 50nm, ce qui assure un transport latéral des charges efficace sur plusieurs micromètres jusqu'aux contacts métalliques, tout en limitant l'absorption parasite de la lumière dans cette couche et la quantité de ce matériau coûteux. L'épaisseur de la couche de a-Si :H est seulement de 100nm[18]. Cette épaisseur permet de collecter correctement les porteurs car la longueur de diffusion des porteurs minoritaires est d'environ 300nm pour le a-Si :H [17]. Pour limiter la rugosité à la surface du ZnO et créer une barrière contre la diffusion de l'Ag dans le silicium, une épaisseur de 100nm a été choisie pour le TCO en face arrière. Une telle épaisseur est compatible avec son absorption et sa conductivité plus faible que pour l'ITO, car l'absorption parasite est restreinte et les charges traversent verticalement la couche de ZnO. Enfin, la couche d'Ag est épaisse de 50nm.

IV-3 Les structures étudiées

Les caractérisations optiques permettent tout d'abord de valider les concepts étudiés et de confronter les résultats de simulations à ceux issus dans la littérature. Dans un premier temps, on considère la structuration d'une simple couche de a-Si :H d'environ 100 nm d'épaisseur. Cette dernière est déposée sur un substrat de verre et un motif 1D et 2D (période et largeur des lignes de a-Si:H notées L et D, respectivement). Les valeurs de Let D ont été choisies sur la base de simulations optiques réalisées par RCWA et permettent d'augmenter

significativement l'absorption intégrée de l'échantillon structuré par rapport à celle de la référence.

IV-3-1 couche mince (référence)

IV-3-1-1 Structure étudiée

La structure servant de base à cette discussion est une couche ultramince absorbante en a-Si:H. ayant une épaisseur arbitrairement fixée à 100nm. Cette couche sera par la suite introduite dans une cellule complète et jouera le rôle de couche active. La singularité de l'approche développée dans cette mémoire consiste à structurer cette couche absorbante en une membrane CP et à optimiser numériquement son absorption sur l'ensemble du spectre utile.

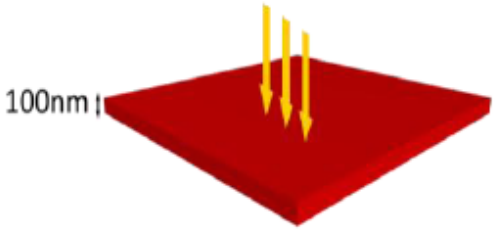


Figure IV.4 : Couches de 100nm d'épaisseur en a-Si :H [21].

IV-3-1-2 Distribution de l'indice de réfraction

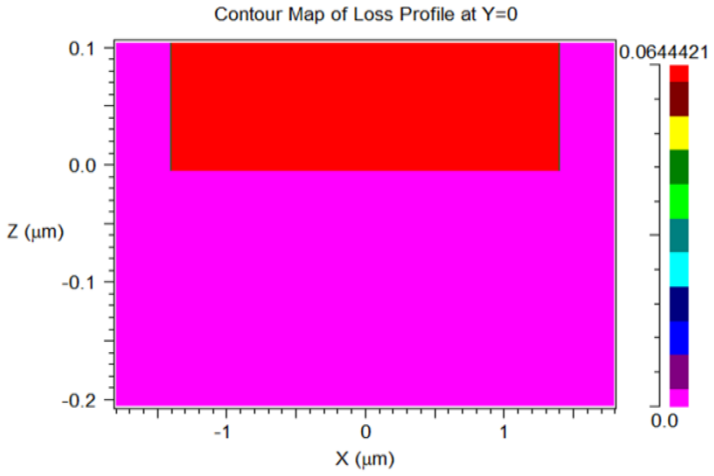


Figure IV.5: Profile de l'indice de réfraction d'une référence (nom structure).

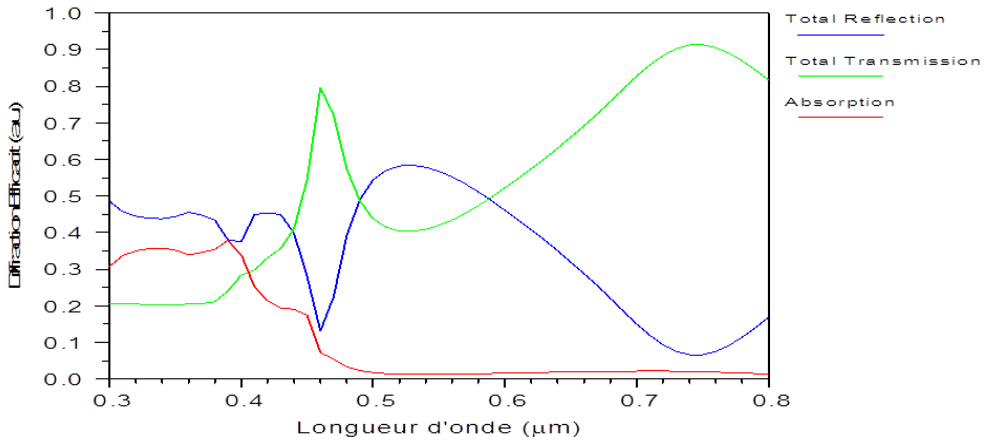


Figure IV.6: Les spectres de Réflexion, transmittance et l'absorption de matériau Si.

Pour un volume en matériau plus faible, on observe que la couche mince absorbe la lumière incidente.

IV-3-1-3 Les spectres d'absorption pour Si et a-Si :H

Pour étudier l'absorption en fonction de paramètre géométrique ; c'est-à-dire l'absorption en fonction de la longueur d'onde sur la face avant pour Si et a-Si :H déposée sur le verre, d'un couche nom structure (référence). Avec l'épaisseur H = 100nm.

- **Le spectre d'absorption pour le Si**

La figure IV.7 représente le spectre d'absorption de la couche nom structure (référence) en fonction de la longueur d'onde à base de matériau Si.

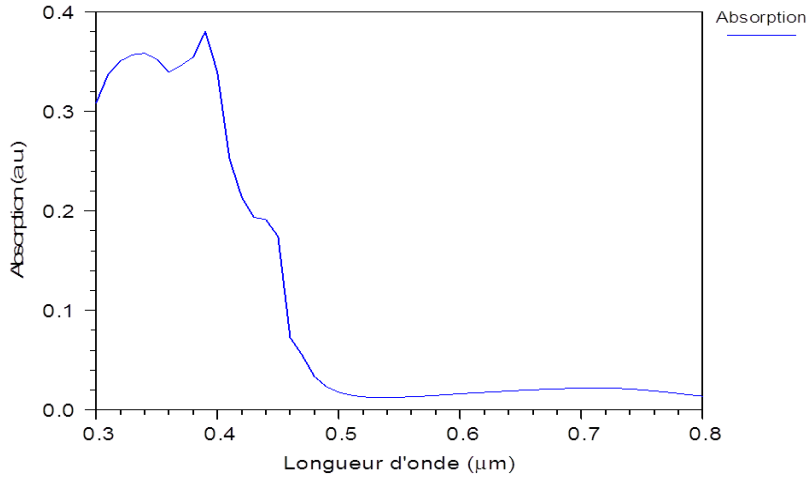


Figure IV.7: Spectre d'absorption de la couche nom structure à base Si.

- **Le spectre d'absorption pour a-Si :H**

La figure IV.8 représente le spectre d'absorption de la couche référence en fonction de la longueur d'onde à base de matériau a-Si :H :

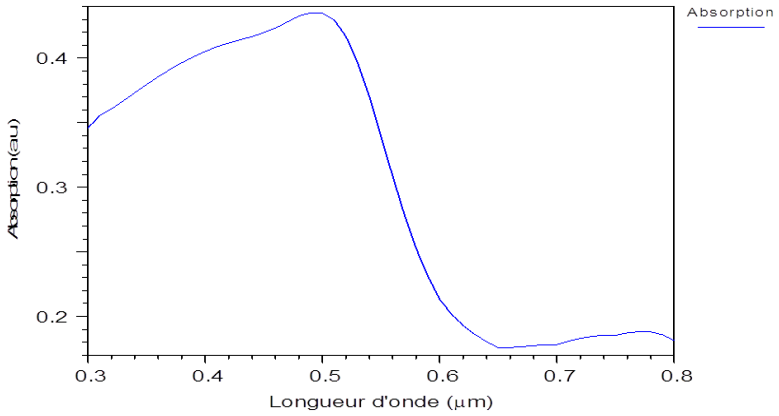


Figure IV.8: Spectre d'absorption de la couche nom structuré à base d'a- Si :H.

Tout d'abord, on remarque que le spectre d'absorption pour le matériau a-Si :H qui donnée une absorption emportent que Si.

Pour finir, il est intéressant de noter que les propriétés d'absorption des couches minces vis-à-vis de l'angle θ d'incidence de la lumière. θ est l'angle d'incidence des rayons monochromatiques défini par rapport à la droite normale à la surface de l'échantillon. Pour la variation de l'angle d'incidence du faisceau avec le matériau utilisé est a-Si :H. Les spectres d'absorption pour différent valeur de θ (0, 45, 90) est :

- **Pour θ=0**

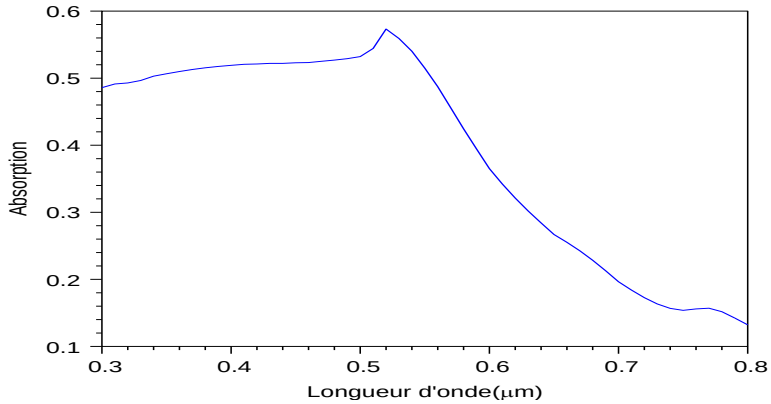


Figure IV.9 : Spectre d'absorption de la couche nom structuré à base de a : Si :H pour θ=0.

➢ **Pour θ=45**

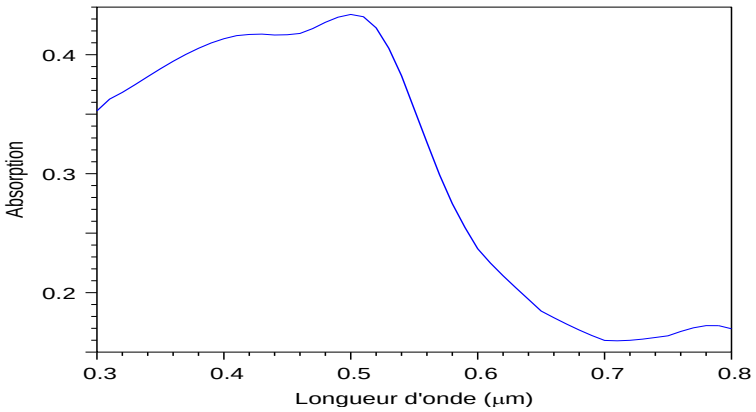


Figure IV.10 : Spectre d'absorption de la couche nom structuré à base de a : Si :H pour θ=45.

➢ **Pour θ=90**

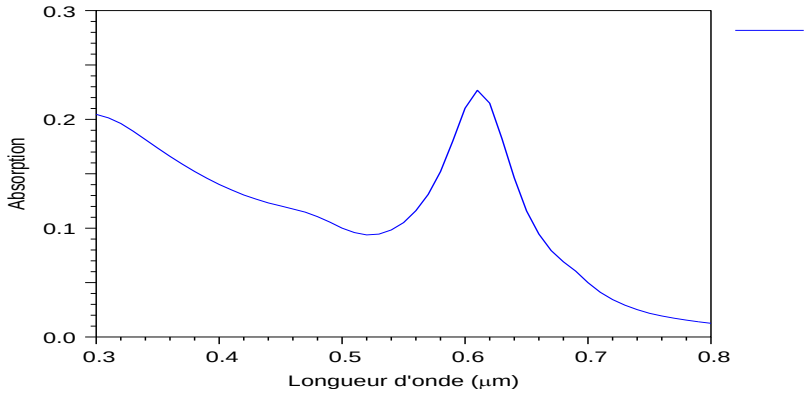


Figure IV.11 : Spectre d'absorption de la couche nom structuré à base de a : Si :H pour θ=90.

IV-3-2 Structure a CPs 1D

Dans cette section, nous considèrerons des CP1D membranaires présentant une période et une largeur de trous notés L et D, respectivement. Ces configurations sont illustrées sur la Figure IV.12.

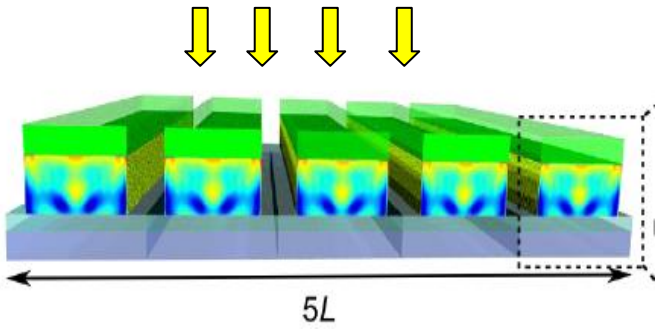


Figure 12: Cellule à CP1D schématisée sur cinq périodes [22].

IV-3-2-1 Structure étudiée

Pour présenter clairement l'effet de la structuration, l'absorption intégrée des CP membranaires est au préalable optimisée en faisant varier simultanément L et le rapport D/L sous une incidence normale de la lumière et pour une épaisseur fixe de la couche. Les paramètres optimaux calculés par [1], sont (L=450nm, D/L=32,5%) pour la configuration 1D

IV-3-2-2Le spectre d'absorption et distribution de l'indice de réfraction pour différent nombre de N

Pour étudier l'absorption en fonction de paramètre géométrique ; c'est-à-dire l'absorption en fonction de la longueur d'onde sur la face avant pour les différentes nombre de période N de a-Si :H déposée sur le verre, d'un cristal photonique 1D. Tout d'abord, on va fixer les paramètres géométriques aux valeurs suivantes : L=350nm, avec l'épaisseur H = 100nm et le facteur de remplissage initiale 55%. La variation seulement sur le nombre de périodes N.

- **Le spectre d'absorption pour N=3**

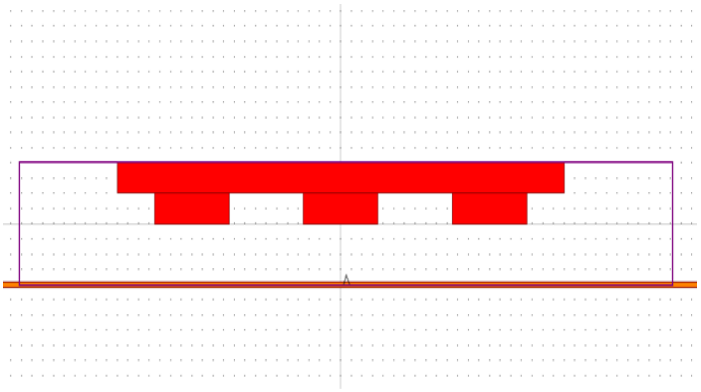


Figure IV.13: Cristal photonique pour N=3, L=350 nm et ff=55%.

- **Distribution de l'indice de réfraction pour N=3**

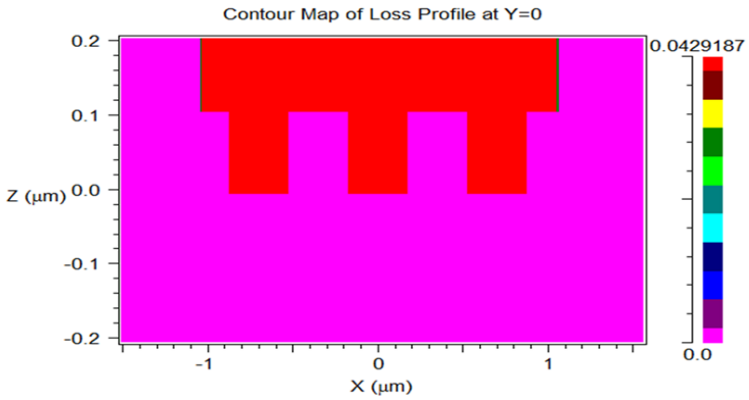


Figure IV.14 : Profile d'indice de réfraction d'une CPs 1D pour N=3.

La figure IV.15 représente le spectre d'absorption de CP1D en fonction de la longueur d'onde pour N=3.

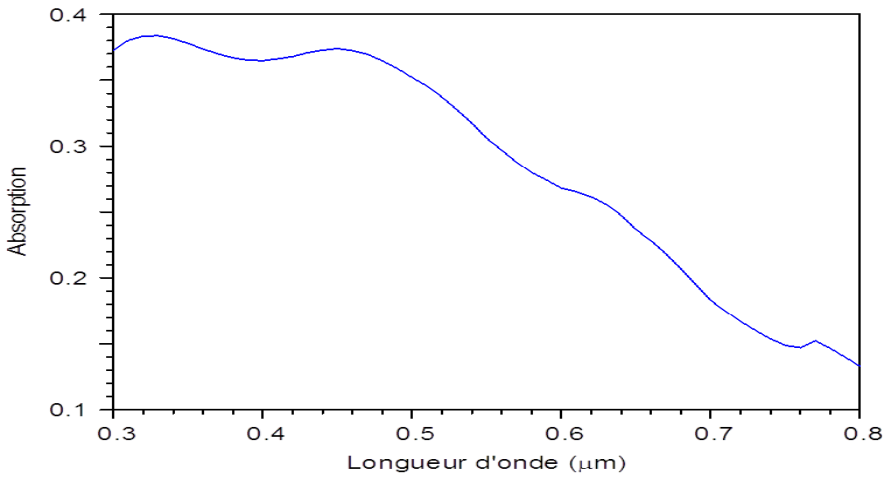


Figure IV.15: Le spectre d'absorption de la structureCP1D pour N=3, L=350 nm et ff=55%.

- **Le spectre d'absorption pour N=5**

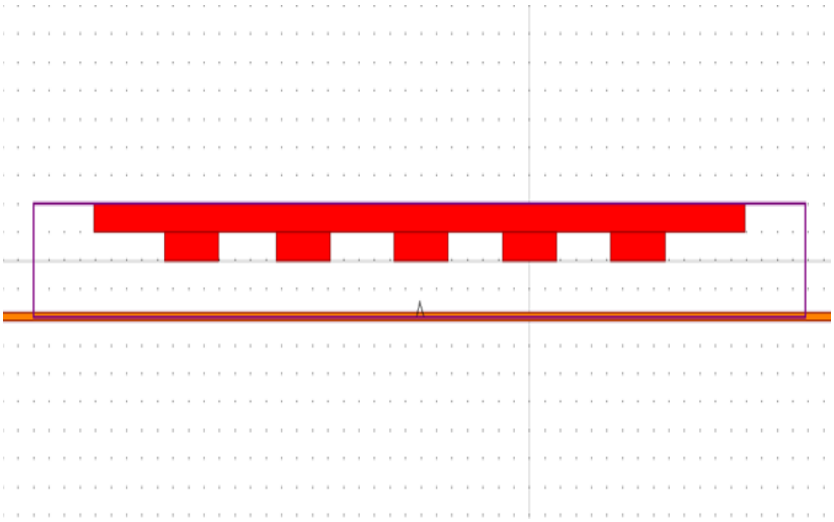


Figure IV.16: Cristal photonique pour N=5, L=350 nm et ff=55%.

- **Distribution de l'indice de réfraction pour N=5**

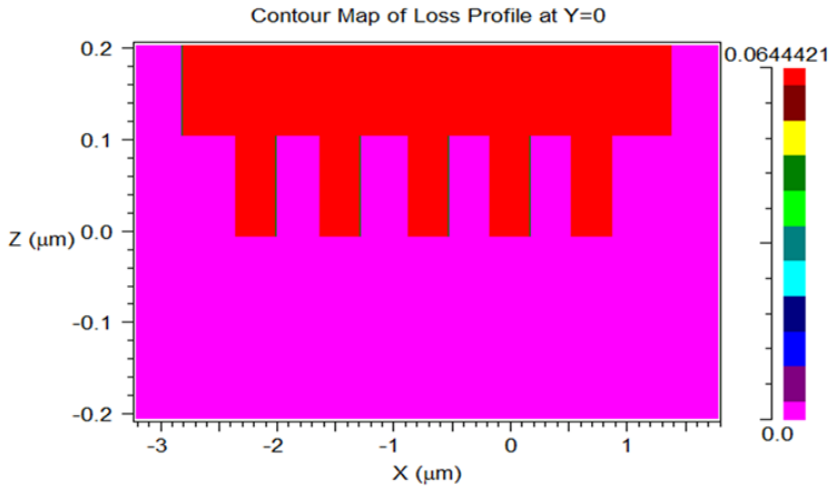


Figure IV.17: Profile d'indice de réfraction d'une CP 1D pour N=5.

La figure IV.18 représente le spectre d'absorption de CP1D en fonction de la longueur d'onde pour N=5.

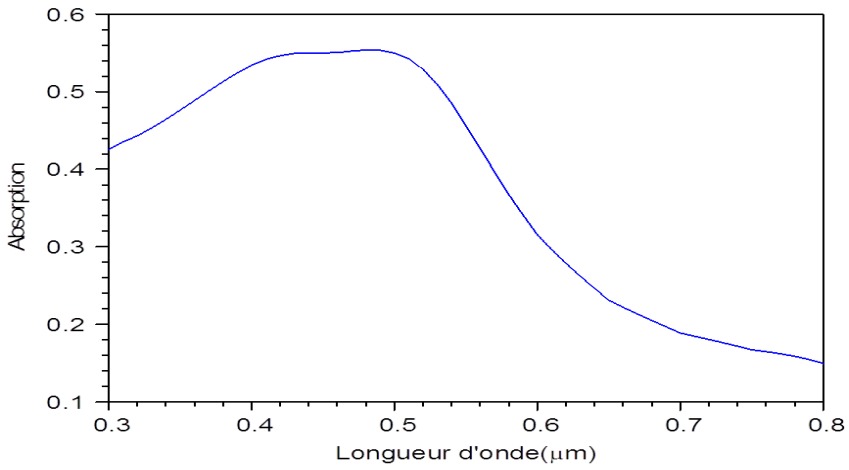


Figure IV.18 : Le spectre d'absorption de la structureCP1D pour N=5, L=350 nm et ff=55%.

- **Le spectre d'absorption pour N=9**

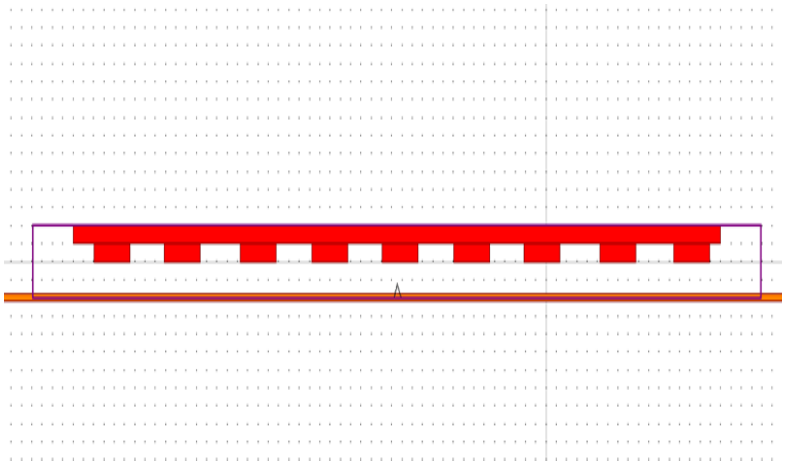


Figure IV.19: Cristal photonique pour N=9, L=350 nm et ff=55%.

- **Distribution de l'indice de réfraction pour N=9**

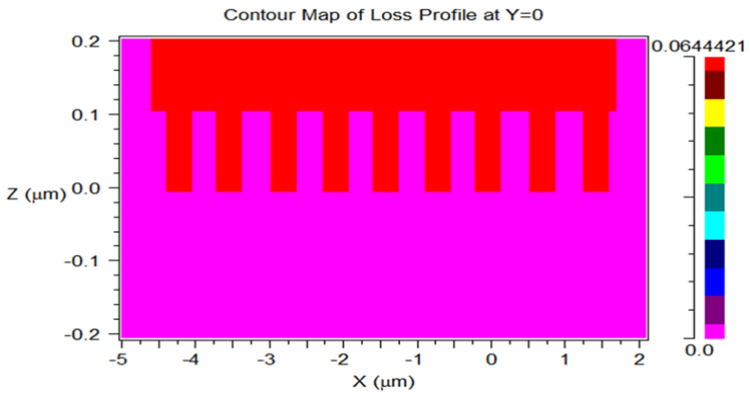


Figure IV.20 : Profile d'indice de réfraction d'une CPs 1D pour N=9.

La figure IV.21 représente le spectre d'absorption de CP1D en fonction de la longueur d'onde pour N=9.

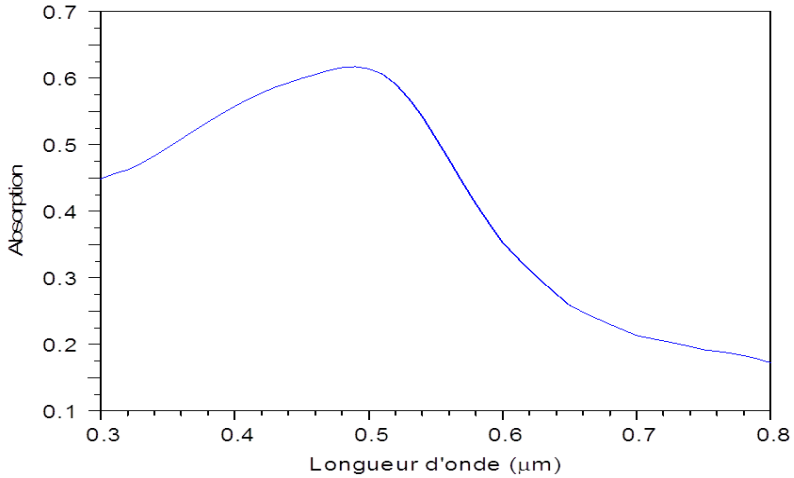


Figure IV.21: Le spectre d'absorption de la structureCP1D pour N=9, L=350 nm et ff=55%.

On reconnait pour les déférentes structures, le spectre d'absorption caractéristique d'une épaisseur de couche de a-Si :H égale 100nm et N (3, 5, 9), Si on augmente le nombre de période N on retrouve l'augmentation de l'absorption aux faibles longueurs d'onde grâce à l'effet d'anti-reflet induit par le réseau de trous. Avec en particulier une décroissance importante de l'absorption au-delà de 550nm.

IV-3-3 Structure a CPs 2D (Trous d'air)

Dans cette section, nous considèrerons des CP2D membranaires présentant une période et une largeur de trous notés L et D, respectivement. Ces configurations sont illustrées sur la Figure IV.22.

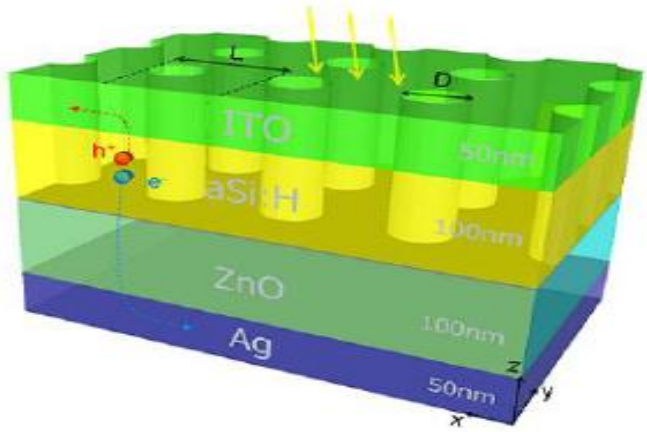


Figure IV.22: Design de la cellule solaire étudiée avec ses principaux paramètres géométriques. Un CP2D à réseau carré est gravé dans la couche d'ITO et dans la couche active. Les paires e--h+ générées dans le a-Si :H sont collectées via les couches TCO environnantes [22].

IV-3-3-1 Structure étudiée

La structure d'étude est un cristal photonique bidimensionnel 2D à réseau carré composé de 8x8 rangés de trous d'air cylindrique.

L'absorption de ce réseau est calculée en fonction de longueur d'onde, la structure fait 8 rangées de long et 8 rangées de large avec l'épaisseur H=100nm. Les paramètres optimaux sont (a=L=300 et le rayon de trou D=2r=200nm) [17].

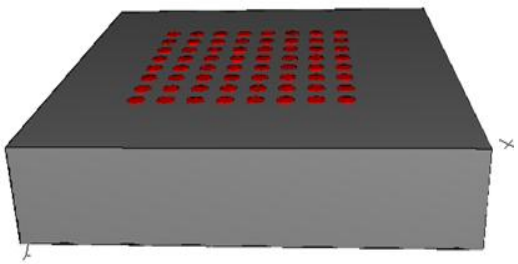


Figure IV.23 : La structure de CPs 2D d'un trous d'air.

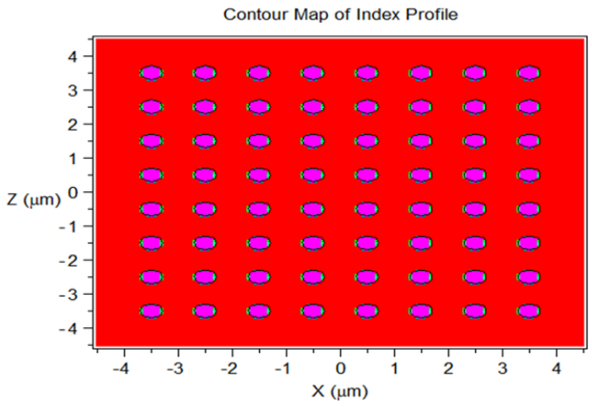


Figure IV.24 : Profile d'indice de réfraction d'une CPs 2D (trous d'air)

IV-5-3-2 Le spectre d'absorption d'une structure CP 2D a trou d'air

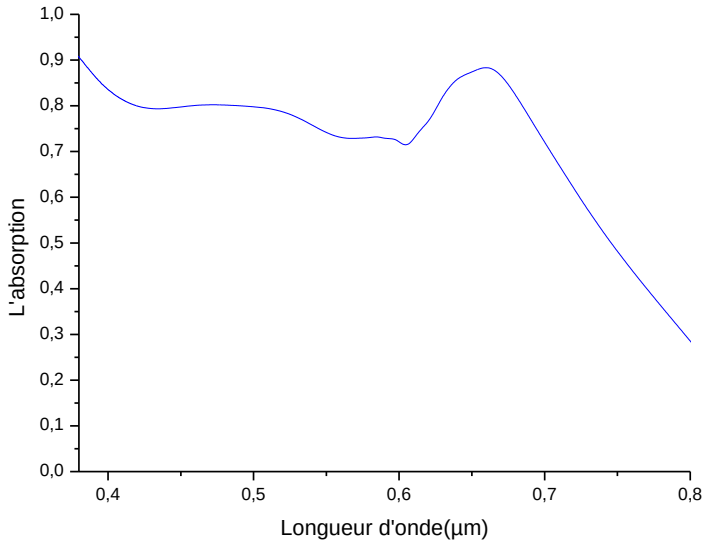


Figure IV.25: Le spectre d'absorption d'un trou d'air, avec L= 400nm, D=200nm.

On reconnait pour la cellule de référence le spectre d'absorption caractéristique d'une couche de a-Si :H de 100nm d'épaisseur, avec en particulier une décroissance importante de l'absorption au-delà de 600nm. On retrouve l'augmentation de l'absorption aux faibles longueurs d'onde grâce à l'effet d'anti-reflet induit par le réseau de trous et la création de pics d'absorption aux grandes longueurs d'onde via le couplage de la lumière incidente avec les modes de Bloch lents du CP membranaire.

Par une comparaison, on observe que les membranes structurées absorbent davantage la lumière incidente que la couche de référence. Les gains relatifs obtenus s'élèvent jusqu'à 91%, ce qui justifie l'intérêt de cette étude. On remarque que la configuration 2D conduit à une absorption plus élevée que la configuration 1D.

IV-4 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de concevoir des cellules solaires à CP2D et d'étudier leurs propriétés optiques. Les simulations optiques et opto-électriques ont mis en évidence les points suivants :

- La possibilité d'augmenter significativement l'absorption intégrée dans la couche active par rapport à une cellule plane de référence
- les membranes structurées absorbent davantage la lumière incidente que la couche de référence
- Les gains relatifs obtenus s'élèvent jusqu'à 91% ce qui justifie l'intérêt de cette étude
- la configuration 2D conduit à une absorption plus élevée que la configuration 1D.

Les points mentionnés ci-dessus tendent à démontrer que notre approche permet d'augmenter significativement l'absorption intégrée des cellules et d'améliorer leur rendement. Les résultats de simulation soulignent également la faisabilité des structures proposées.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Les cellules photovoltaïques ou les plaques solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé ‘‘effet photovoltaïque’’ qui est à l’origine du phénomène.

Afin de converger vers la parité réseau et de faciliter l’intégration des cellules solaires photovoltaïques dans notre environnement, des absorbeurs en couches minces ont été développés, donnant naissance aux cellules dites de 2ème génération. Aujourd’hui, cet effort de réduction des coûts se poursuit, ce qui se traduit notamment par un amincissement des couches actives. Le rendement de ces cellules ultraminces souffre néanmoins de la faible absorption de la lumière, en particulier pour les longueurs d’onde situées près du gap du matériau absorbant considéré .

Pour favoriser le piégeage de la lumière tout en augmentant sa collection, nous nous sommes proposé de structurer une couche active mince comme un CP membranaire, et on va déduire la couche qui donné la meilleur absorption, cette couche en a-Si :H de 100nm d’épaisseur a été retenue pour valider cette approche, en utilisé les réseaux 1D et 2D. Avec l’outil de simulation Rsoft CAD pour calculé l’absorptions à l’aide de module « DiffractMOD » avec la méthode RCWA.

Les propriétés optiques de CP membranaires 1D et 2D à réseau carré ont finalement été étudiées grâce au calcul de leur absorption intégrée dont la méthodologie a été présentée en début de chapitre. Après optimisation de leurs paramètres géométriques (période et facteur de remplissage en air), nous avons conclu que les CP2D membranaires conduisaient à des gains optiques plus importants que pour leur équivalent 1D, tout en présentant une insensibilité à la polarisation de la lumière en incidence normale. Cela a motivé notre choix de justifie l’intérêt de l’introduction d’une structuration 2D de trous dans une cellule solaire complète.

L’augmentation de l’absorption dans ces structures a ensuite été interprétée sur la base de spectres d’absorption simulés. Tout d’abord, nous avons mis en évidence un effet d’anti-reflet aux faibles longueurs d’onde grâce à la nano-structuration de la couche absorbante.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

[1] Guillaume Gomard, « Cristaux photoniques pour le contrôle de l'absorption dans les cellules solaires photovoltaïques silicium ultraminces», Thèse de doctorat, École Centrale Matériaux de Lyon, Octobre 2012.

[2] Bendjellouli Zakaria, « contribution à la modélisation d'une cellule solaire », Mémoire Magistère, Université de Bechar (2008).

[3] Bouafia Mounir, Deblaoui Laid, «Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium « CIGS » », mémoire de mestre, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2012.

[4] Guettouchi Tahar « Etude d'une cellule solaire a base de CGT (CuGaTe2) », mémoire de mestre, Université de Ferhat Abbas de - Setif 1 -,2014.

[5] : Bencherrat Abdennebi , « Étude de transfert des films minces de silicium monocristallin dans la réalisation de cellule solaire à faible budget thermique», mémoire de mestre, Université Abou-Bekr Belkaïd –Tlemcen,2012.

[6] : Zemmit Hayet, «Détermination du facteur d'idéalité d'une cellule solaire en couche mince », mémoire de mestre, Université de Ferhat Abbas de - Setif 1 -,2012.

[7] : Bensaci Wafa, «modélisation et simulation d'un système photovoltaïques adapté par une commande MPPT », mémoire de mestre, Université d'Ouargla, 2011.

[8] : Halib Kheira, «Amélioration de l'absorption dans les cristaux photoniques 1D», mémoire de mestre, Université de M'sila, 2013.

[9] : Fekairi Mohamed Amine, «Modélisation des cellules solaires à hétérojonctions et à couches minces (CIS) », mémoire de mestre, Université de Ferhat Abbas de - Setif 1 -,2011.

[10] : Petibon Stéphane, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », thèse de Doctorat, L'université DE Toulouse, 2009.

[11] :Benaissa Fatima, « Etude et Simulation de la Propagation des Ondes Electromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres Optiques», Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2013.

[12] : Aidi Abd Errahmane « Etude et modélisation de la bande interdite photonique dans les cristaux Photoniques bidimensionnels : cas d'une structure connectée », Mémoire de Master, Université de M'sila.

[13] : Driss Imad-Eddine, « Simulation et optimisation d'un diviseur 1x8 à base de cristaux photoniques bidimensionnels modélisation par la méthode FDTD-2D », Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2014.

[14] : Saidani Asma, «application des méthodes stochastiques pour l'optimisation des filtres passe bande à base des cristaux photoniques unidimensionnels », Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2014.

[15] : Ahlem Benmerkhi, « Optimisation du confinement de la lumière dans des cavités a cristaux photoniques», Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2012.

[16] : Ahlem Benmerkhi, «Influence des paramètres géométriques sur la cavité à cristaux photoniques bidimensionnels », Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2008.

[17] : Ben djelloul Rahima, «Etude du couplage dans les guides d'onde à cristaux photoniques », mémoire magister, Université Mentouri Constantine, 2009.

[18] : Rsoft Design Group, DiffractMOD.

[19] : Christophe Sauvan, «Etude de la propagation et du confinementde la lumière dans des nanostructures », These Docteur, Université Paris XiOrsay, 13 octobre 2005.

[20] : Sourisseau Sébastien, « spectroscopie uv visible».

[21] : Guillaume Gomard, Romain Peretti, Emmanuel Drouard, Xianqin Meng, and Christian Seassal, «Photonic crystals and optical mode engineering for thin film photovoltaics», Optical Society of America, Vol. 21,(2013).

[22] : Guillaume Gomard, Ounsi El Daif, Emmanuel Drouard, Xianqin Meng, Anne Kaminski, Alain Fave, Mustapha Lemiti, Enric Garcia-Caurel, Pere Roca i Cabarrocas,

Christian Seassal, «Design and fabrication ofphotonic crystal thin film photovoltaic cells », Proc. of SPIE Vol. 7725 77250M-1, 2010

Résumé

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Notamment grâce aux innovations technologiques. Un pas important a été franchi dans ce sens grâce à la mise en place d'une filière utilisant des couches minces, réduisant significativement la quantité de matériau actif nécessaire. Aujourd'hui, ces efforts se poursuivent et des couches semi-conductrices ultraminces voient le jour. Du fait de leur faible épaisseur. ces couches souffrent d'une faible absorption de la lumière, ce qui limite le rendement de conversion des cellules.

Pour répondre à ce problème, les concepts issus de la nano-photonique peuvent être employés afin de contrôler la lumière à l'échelle des longueurs d'onde mises en jeu. Dans ce contexte, nous proposons de structurer la couche active des cellules solaires en cristal photonique (CP) absorbant. Cette nano-structure périodique assure simultanément une collection efficace de la lumière aux faibles longueurs d'onde et un piégeage des photons dans la couche active (ici en silicium amorphe hydrogéné) pour les longueurs d'onde situées près de la bande interdite du matériau absorbant.

Dans le cadre de cette étude, des simulations optiques ont été utilisées de manière à optimiser les paramètres du CP, engendrant ainsi une augmentation de l'absorption dans la couche active sur l'ensemble du spectre utile. Les structures étudié dans ce mémoire sont des structures à cristaux photoniques unidimensionnel et bidimensionnel à base d'a-Si :H structuré à (réseau carré trous d'air). Nous avons conclu que :

- La possibilité d'augmenter significativement l'absorption intégrée dans la couche active par rapport à une cellule plane de référence
- les membranes structurées absorbent davantage la lumière incidente que la couche de référence
- D'autre part, lorsque le nombre de période «N» augmente, le spectre d'absorption augmente
- la configuration 2D conduit à une absorption plus élevée que la configuration 1D.

Mots –clés : Cellules solaires photovoltaïques, cristaux photoniques, piégeage de la lumière diffract MOD**.**

Abstract:

A photovoltaic cell is an electronic component which, exposed to light (photons), produces electricity through the photovoltaic effect which is the origin of the phenomenon. notably thanks to the technological innovations. The use of thin-films based solar cells was an important step towards that direction since it enabled to decrease the amount of active material needed. Recently, ultrathin semi-conductor layers have emerged.

Due to their limited thickness, those layers are suffering from a weak absorption of the incoming light which degrades the conversion yield of the resulting cells.

To tackle this issue, nano-photonic concepts may offer well-suited solutions to handle the light at the wavelength scale. In this context, we propose to pattern the active layer of solar cells as an absorbing photonic crystal (PC). This periodical nano-structure ensures simultaneously an efficient collection of the light at low wavelengths, together with an appropriate method for trapping photons inside the active layer for the wavelengths close to the material bandgap, which in our case consists in hydrogenated amorphous silicon..

In the framework of this study, optical simulations were used to optimize the PC parameters so as to provide a significant absorption increase over the whole spectrum considered The structures studied in this thesis are one-dimensional photonic crystal structures based on two-dimensional and a-Si: H structured (square lattice air holes). We concluded that:

- The possibility to significantly increase the integrated absorption in the active layer with respect to a plane reference cell.
- structured membranes absorb more incident light than the reference layer.
- the other hand, when the number of periods "N" increases, the absorption spectrum increases
- 2D configuration leads to a higher absorption than the 1D configuration.

Keywords: solar photovoltaic cells, photonic crystals, light trapping, diffract MOD**.**