

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA- Bejaïa
Faculté de Technologie
Département de Génie électrique



Mémoire de Fin de cycle

En vue d'Obtention du diplôme de Master Académique

Filière: Electronique

Spécialité: Télécommunications

Thème

Commandes optiques d'une ligne de transmission

Présenté par:

M^{elle} KHERBACHE Nawal.

Promoteurs:

**Mr. S. BERRAH.
Mr. M. ROUHA.**

Jury:

**Pr. K. KHIRDINE
M^{elle} N. BOUZARA**

**Président du jury
Examinatrice**

Promotion 2012-2013

Remerciements

Ce travail a été effectué au Département de Génie Electrique de Bejaïa, dans le cadre du projet de recherche intitulé "Commandes optiques d'une ligne de transmission", dirigés par monsieur BERRAH et monsieur ROUHA.

Je tiens tout d'abord à remercier mon promoteur, monsieur BERRAH, qui m'a soutenu et encouragé durant ce travail, pour tous ces conseils avisés et pertinents.

J'exprime ma profonde reconnaissance et mes remerciements à mon co-promoteur, monsieur ROUHA, pour son aide, le soutien qui m'a porté et pour toutes ces remarques et ces conseils.

Je remercie Mr BOULIFA pour ces encouragements.

J'adresse également mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté de juger ce travail.

Je tiens aussi à présenter mes remerciements à tous mes enseignants de l'Université A. Mira de Bejaïa, qui nous ont toujours enrichis de leurs savoirs.

Ainsi que toute personne qui, d'une manière ou d'une autre, qu'ils m'ont aidé et encouragé à l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

Je voudrais dédier ce modeste travail à :

Ma très chère mère, qui a toujours été présente pour moi, dans les moments les plus difficiles et qui sans cesse veille sur moi avec ses prières, pour ses grands sacrifices et tout l'amour qu'elle me porte.

Mon très cher père, pour tous ses conseils et pour toute la confiance qu'il a mis en moi et pour son dévouement pour mon bonheur.
Que dieu me les garde.

A mes chères frères: Lamine, Boualam, Mounir, A.Hafid et ma petite jolie sœur Yasmine (MIMINE).

A chaque membre de famille :
Mes tantes et mes oncles.

Et aux anges de la famille :
Nour el Houða et A. Raouf.

A monsieur BOULIFA qui m'a toujours encouragé et je le remercie infiniment.

A mes très chères amis (es) : Lila, Kamilia, Ryma, Diða, Najet, Nassim et Farid.

A mes profs et tous les amis de la promotion Télécommunication sans exception.

Table des matières

REMERCIEMENT	i
LISTE DES FIGURES.....	ii
LISTE DES TABLEAUX.....	iv
INTRODUCTION GENERALE.....	1

CHAPITRE I

Lignes de transmission

1. Introduction	2
2. Ligne de transmission.....	2
2.1. Paramètre primaire	3
2.2. Les paramètres secondaires	4
3. Différents types de lignes à bande.....	5
3.1. La ligne microbande.....	5
3.2. La ligne à fente.....	6
3.3. La ligne coplanaire	6
3.4. La ligne triplaqu	7
4. Etude de la ligne micro-ruban	7
4.1 La structure.....	7
4.1. La permittivité effective	8
4.2. Les paramètres caractéristiques de la ligne	Erreur ! Signet non défini.
4.3. Calcul de la permittivité diélectrique effective et de l'impédance caractéristique en fonction de la géométrie de la ligne et	9
4.4. Dimension d'une ligne micro-ruban en fonction de	11
5. Influence des dimensions du ruban sur la ligne.....	11
5.1. Influence de l'épaisseur du ruban	11
5.2. Influence de la fréquence.....	12
5.3. L'affaiblissement de la ligne micro-ruban	13
6. Conclusion.....	14
7. Bibliographie.....	15

CHAPITRE II

Généralité sur la photodétection et les photodétecteurs

1. Introduction	16
2. La photodétection	16
3. Paramètres d'un photodétecteur	17
4. Les différents types de photodétecteurs	18
a) La photodiode PN classique	18
b) La photodiode PIN	19
➤ La photodiode PIN à éclairage vertical	19
➤ La photodiode PIN à éclairage latéral	20
c) La photodiode à avalanche	21
d) Le photodétecteur Métal-semi-conducteur (MSM)	22
e) Les photodétecteurs ultraviolets (UV)	23
f) Le phototransistor	23
5. Exigences et qualités principales des photodétecteurs	24
6. Comparaison entre structures photoconductrices	25
7. Conclusion	26
8. Bibliographie	26

CHAPITRE III

Performances des photodétecteurs PIN, APD et MSM

ET simulation

1. Introduction	27
2. Caractéristiques du photodétecteur	27
3. La photodiode PIN	27
3.1. Bruit des photodiodes PIN	30
a. Le bruit quantique (bruit photonique, de grenaille ou encore bruit de schottky)	30
b. Bruit d'obscurité	30
c. Bruit thermique	30
d. Bruit total introduit par la photodiode PIN	31

4. Les photodiodes à avalanche PDA	32
5. Photodiodes MSM (METAL-SEMI-CONDUCTEUR-METAL)	33
5.1. Théorie de la photodiode Schottky	34
Partie II : Simulation	38
1. Introduction	38
Simulation à l'aide du logiciel AWR	38
2. Présentation du logiciel AWR DESIGN (Applied Wave Research)	38
3. Le cas de la ligne coplanaire (CPW)	38
3.1 La photodiode PIN	41
3.2 La photodiode MSM	43
Simulation avec logiciel COMSIS	44
4. Présentation générale du logiciel COMSIS	44
4.1. La partie émission	45
4.1.1. Le laser	45
4.1.2. Les données électriques	45
4.2. La partie réception	47
4.2.1. Photodiode PIN	47
4.2.2. Photodiode APD	48
5. Conclusion	49
6. Bibliographie	50
 CONCLUSION GENERALE	 51

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Schéma d'une ligne de transmission	2
Figure I.2 : Circuit équivalent d'un tronçon de la ligne de longueur dx	3
Figure I.3 ligne micro bande (micro strip)	6
Figure I.4 ligne à fente (slot line) 1	6
Figure I.5 ligne coplanaire (coplanar waveguide).....	6
Figure I.6 ligne triplaque	7
Figure I.7 vue en coupe d'une ligne micro-ruban	7
Figure I.8 ligne du champ d'une ligne micro-ruban.....	8
Figure II.1 Principe d'absorption de la lumière dans le cas de semi-conducteurs intrinsèque et extrinsèque	16
Figure II.2 la photodiode PN	19
Figure II.3 géométries schématiques de photodiode PIN : flux optique et transport de charge (a) colinéaire et (b) orthogonales	20
Figure II.4 Effet avalanche: une paire électron-trou photocréée génère d'autre paire par ionisation par impact	21
Figure II.4 Effet avalanche: une paire e^-h^+	Erreur ! Signet non défini.
Figure II.6 : Schéma de la structure d'un phototransistor à éclairage vertical.....	24
Figure III.1 : Courbes de sensibilité et de rendement selon les longueurs d'onde pour divers matériaux 1	28
Figure III.2 : Structure d'une photodiode PIN	29
Figure III.3 : Schéma équivalent de la photodiode PIN polarisée en invers	31
Figure III.4 : Structure d'une photodiode à avalanche $p\pi np$	32
Figure III.5 : Vue en coupe d'une photodiode MSM	33
Figure III.6 : Caractéristique courant-tension typique d'une photodiode à barrière Schottky. 34	
Figure III.7 : structure d'une MSM-PD. De haut en bas	35
Figure III.8 : Exemple de structure MSM interdigitée.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure III.9 : Schéma équivalent de la PDMSM	37
Figure III.10 : Schéma électrique pour une CPW seule	38
Figure III.11 : Coefficients de réflexion pour la ligne CPW	39
Figure III.12 : Coefficients de transmission pour une ligne CPW	39
Figure III.13 : Coefficients de réflexion	40
Figure III.14 : Coefficients de transmission.....	40
Figure III.15 : Une ligne comporte du photodétecteur PIN	41
Figure III.16 : coefficients de réflexion pour la PIN.....	42
Figure III.17 : coefficients de transmission pour la PIN	42
Figure III.18 : Une liaison optique en intégrant la PDMSM.....	43
Figure III.19 : Coefficients de réflexion pour la PDMSM.....	43
Figure III.20 : Coefficients de transmission pour la PDMSM	43
Figure III.21 : Schéma bloc d'une liaison optique	45
Figure III.22 : Modèle de simulation du laser	45
Figure III.23 : Caractéristique puissance optique en fonction du courant du laser	46

Figure III.24 : Modèle de simulation du courant laser	46
Figure III.25 : Schéma bloc d'une liaison optique en utilisant à la réception la photodiode PIN	47
Figure III.26 : La puissance en fonction du temps en entrée et en sortie du laser et la photodiode PIN	47
Figure III.27 : Schéma bloc d'une liaison optique en utilisant la photodiode APD à la réception	48
Figure III.28 : La puissance en fonction du temps en entrée et en sortie du laser et la photodiode APD	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1:Tableau comparatif entre différents photodétecteurs	26
Tableau III.1 : Valeurs typiques des éléments du circuit équivalent du PDMSM	37
Tableau III.2 5: Paramètres caractéristique du laser	45
Tableau III.3 : paramètres aractéristique de l'entrée représentant l'information à transmetre	46

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

La photodétection représente une fonction qui trouve sa place dans un grand nombre de systèmes. Les applications sont nombreuses : télécommunications optiques, capteur solaire, détecteur de présence..., et sont toutes fondées sur le même processus : transformer une puissance lumineuse en signal électrique, ce signal devant être le plus élevé possible, pour un flux optique aussi faible que possible. Ces considérations élémentaires impliquent qu'un certain nombre de performances soient atteintes, pour satisfaire aux exigences de l'application envisagée. Le domaine de longueurs d'onde visé dans l'application joue aussi un grand rôle. C'est souvent lui, par l'intermédiaire de la bande interdite du semi-conducteur, qui détermine la nature du ou des matériaux employés.

Ce travail constitue à l'étude portant sur les composants d'extrémités d'une transmission par fibre optique qui sont les photodétecteurs, et l'accent sera précisément, sur les photodétecteurs PIN, APD (photodiode à avalanche) et MSM (Métal-semi-conducteur-Métal).

L'objectif principal est d'étudier les performances et les caractéristiques des photodétecteurs PIN, APD et MSM.

Pour ce faire, ce travail est divisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, on va définir la ligne de transmission et différentes lignes de transmission à bande car on va intégrer les photodétecteurs dans une ligne à bande pour les étudier.

Ensuite, on va prendre un exemple d'une ligne à bande pour donner ces caractéristiques.

Dans le deuxième chapitre, on va exposer les principes de base de la photodétection. Les structures et fonctionnements des photodétecteurs les plus connus seront exposés tels les photoconducteurs, les photodiodes PN et PIN, les photodiodes à avalanche APD, les photodétecteurs MSM (Métal- semi-conducteur- Métal), les photodétecteurs ultraviolets, ainsi que les phototransistors. Parmi ces photodétecteurs, certains sont plus utilisés et offrent des potentialités intéressantes. Un tableau comparatif est établi pour mettre en évidence les caractéristiques de chacun.

Dans le dernier chapitre, il comporte deux parties ; la première partie consiste à définir les caractéristiques du photodétecteur, ainsi on va détailler les photodiodes PIN, APD et MSM afin de comprendre leur mécanisme de création.

La deuxième partie est la partie de simulation où on va définir le logiciel qu'on va utiliser pour obtenir les coefficients de réflexion et de transmission des photodétecteurs PIN et MSM avec le logiciel AWR.

A l'aide du logiciel COMSIS, on va visualiser le signal d'entrée et le signal de sortie dans une liaison optique comportant des photodétecteurs PIN puis APD.

CHAPITRE I

Lignes de transmission

1. Introduction

Les lignes de transmission permettent le transfert des informations. Les distances à parcourir, la bande passante des signaux et la technologie utilisée dépendant du type d'information. Ainsi, les lignes utilisées pour les liaisons téléphoniques transatlantiques sont des fibres optiques de plusieurs milliers de kilomètres de longueur propageant des ondes électromagnétiques à des fréquences optiques ($>10^{15}$ Hz), alors que celles reliant les composants électroniques dans un circuit intégré sont des pistes de quelque microns de long propageant des ondes électriques et électromagnétiques à des fréquences allant de quelques Hz à quelque GHz. Elles ont toutes pour but de guider l'information sans perturbation, c'est-à-dire sans trop d'atténuation ou de déformation.

Une ligne de transmission est une structure à deux conducteurs parallèle dont la géométrie transversale est uniforme sur toute la longueur. Les principales géométries sont :

- La ligne coaxiale
- La ligne bifilaire symétrique
- La ligne bifilaire torsadée
- La ligne micro-ruban

On va rappeler les différents types de lignes à bande et ces caractéristiques [1].

2. Ligne de transmission

Une ligne de transmission est un ensemble d'un (en réalité deux si l'on considère la masse), ou de plusieurs conducteurs acheminant un signal électrique, d'une source (ou émetteur) vers une charge (ou récepteur). Elles peuvent être aussi utilisées pour réaliser des filtres, des transformateurs d'impédance, des coupleurs, des lignes à retard... [2].

En hautes fréquences, du fait que la longueur de la ligne est, en général, grande devant la longueur d'onde λ , il en résulte que la tension et le courant varient le long de la ligne, donc il est impossible, du moins dès que la ligne n'est pas de longueur très faible devant la longueur d'onde λ , de la modéliser par un seul quadripôle.

Il faut alors faire l'approximation qui revient à découper la ligne en une suite d'éléments identiques. L'élément unité étant pris très petit devant λ pour qu'on puisse le représenter par un quadripôle à constantes localisées (figure II.1 et II.2).

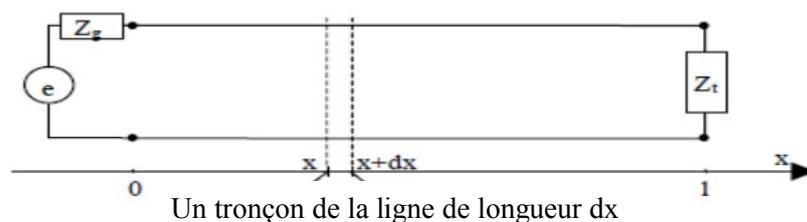


Figure I.1 : Schéma d'une ligne de transmission.

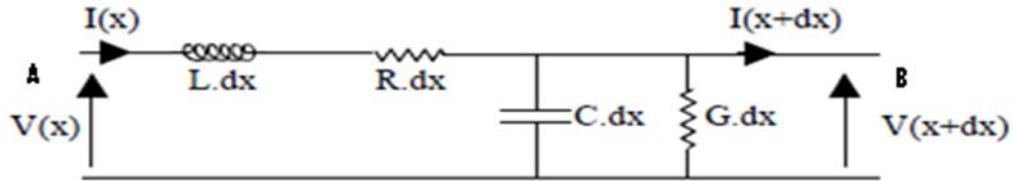


Figure I.2 : Circuit équivalent d'un tronçon de la ligne de longueur dx .

Ce tronçon élémentaire de longueur dx est constitué de quatre éléments : R, L, C et G qui sont respectivement la résistance, l'inductance, la capacité et la conductance de fuite linéiques.

Si en un point A-B, on applique une tension $V(x)$ donnant naissance à un courant $I(x)$, les tensions $V(x+dx)$ et les courants $I(x+dx)$ en un point quelconque, distant de x du point A-B sont obtenues grâce aux équations [3] :

$$V(x) = V(x+dx) + \frac{dV}{dx} dx \quad (I.1)$$

$$I(x) = I(x+dx) + \frac{dI}{dx} dx \quad (I.2)$$

étant l'impédance caractéristique de la ligne et le terme γ est la constante de propagation de la ligne qui est en général un terme complexe :

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (I.3)$$

Où α est le facteur d'amortissement (ou paramètre d'affaiblissement linéique) et β est le facteur de phase [3].

2.1. Paramètre primaire

Chaque tronçon élémentaire est caractérisé par les quatre paramètres suivants :

- la résistance linéique : $[\Omega /]$
- la conductance linéique : $[/]$
- l'inductance linéique : $[/]$
- la capacité linéique : $[/]$

Les paramètres R et G représentent les pertes d'énergie active et réactive dans le conducteurs.

Chapitre I

Les paramètres R et G représentent les pertes d'énergie active et réactive dans le diélectrique.

α est défini en fonction du facteur de qualité Q :

$$\alpha = \frac{R}{Z_0} \quad (I.4)$$

Lorsque les paramètres R et G sont nuls, on dit que la ligne est sans pertes. Cette simplification est très souvent admise pour les lignes courtes.

Dans le cas d'une ligne sans perte : $R = 0$ et $G = 0$ et d'après I.3 on déduit :

$$\alpha = 0 \Rightarrow \beta = \sqrt{\omega^2 LC} \Rightarrow \beta = \omega \sqrt{LC} \Rightarrow \alpha = 0$$

2.2. Les paramètres secondaires

➤ La vitesse de propagation

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r \epsilon_0 \mu_0}} \quad (I.5)$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{\omega}{v}$$

ϵ_r , μ_r : sont respectivement les permittivités relatives de l'aire et du substrat.

μ_r , ϵ_r : sont respectivement les perméabilités relatives de l'aire et du substrat.

L'expression de la vitesse de propagation devient :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (I.6)$$

D'où $\beta = \frac{\omega}{v}$

c : la vitesse de la lumière.

➤ L'impédance caractéristique

L'effet de l'impédance caractéristique d'une ligne de transmission est similaire à celui de l'indice de réfraction du milieu en optique où l'intensité du faisceau réfléchi à l'interface de deux milieux exprime la désadaptation d'indice des milieux. Cette impédance dépend des dimensions et des caractéristiques intrinsèques de la ligne. En général, pour une simple ligne de transmission de longueur l dont le modèle est représenté sur la figure II.2, l'impédance caractéristique en régime harmonique est obtenue à partir des équations télégraphistes [4] :

$$= \frac{\frac{1}{\sqrt{LC}}}{\sqrt{LC}} \quad (I.7)$$

Dans le cas des lignes avec pertes, l'impédance caractéristique varie en fonction de la fréquence et la ligne est dite dispersive. Cette dispersion se traduit par un affaiblissement du signal.

En général, les lignes hyperfréquences sont conçues pour avoir de faibles pertes. Pour des lignes sans pertes, on a $\alpha \cdot l \gg 1$ et $\beta \cdot l \gg 1$ ce qui implique que [8], $\gamma = 0$
 $Z_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \Rightarrow Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ et l'impédance dans ce cas est purement réelle, et donnée par :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (I.8)$$

On a : $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ donc $\beta Z_0 = \omega L$

Pour une ligne de transmission, ce résultat peut également être exprimé en fonction de L et C :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (I.9)$$

Où Z est l'impédance intrinsèque de l'aire.

Le mode de propagation dans les lignes est le mode TEM. D'où les lignes TEM, la tension et le courant gardent le même sens, en effet les champs électriques et magnétiques se trouvent dans des plans perpendiculaires aux conducteurs (direction de propagation) d'où l'appellation TEM (**T**ransversal **E**lectric and **M**agnetic field).[5]

La vitesse de propagation dans le mode TEM est définie par :

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (I.10)$$

ε : est la permittivité du milieu où s'effectue la propagation.

Il est plus pratique de connecter et d'intégrer les lignes micro-ruban dans un circuit.

3. Différents types de lignes à bande [6]

3.1. La ligne microbande

Elle comporte un substrat diélectrique, complètement métallisé sur l'une de ces faces (plan de masse) et d'une bande métallique (ruban) sur l'autre, figure (I.3) :

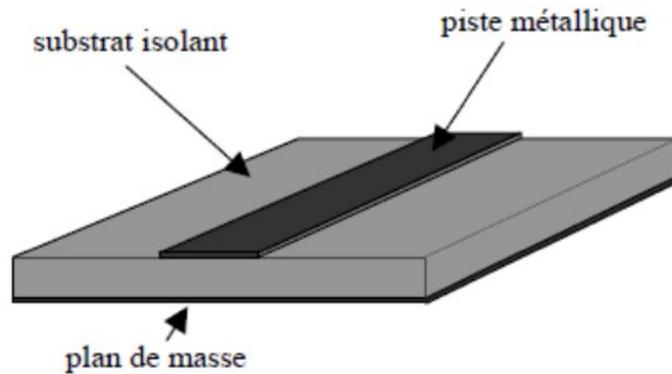


Figure I.3 ligne micro bande (micro strip)

3.2. La ligne à fente

La ligne à fente est constituée de deux conducteurs déposée sur la même face du substrat diélectrique, la deuxième face n'est pas métallisée, figure (I.4).

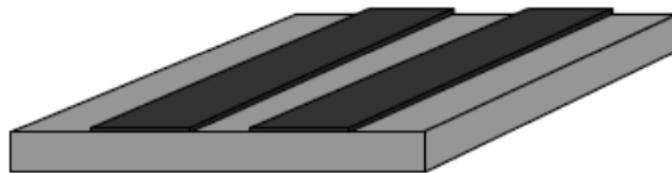


Figure I.4 ligne à fente (slot line)

3.3. La ligne coplanaire

La ligne coplanaire est constituée de trois bandes métalliques séparées par deux fentes sur la même face du substrat, la deuxième face n'est pas métallisée, figure (I.5).

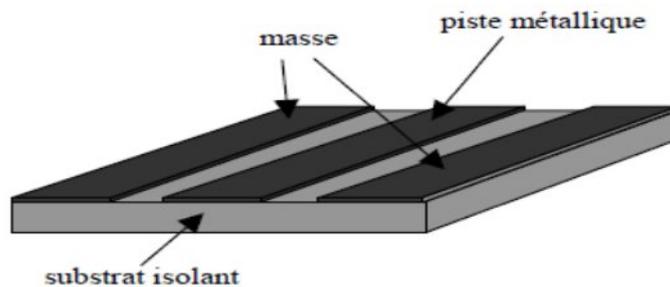


Figure I.5 ligne coplanaire (coplanar waveguide)

3.4. La ligne triplaque

C'est une ligne qui est constituée d'un ruban conducteur placé entre deux couches de diélectrique placé à leur tour entre deux plans de masse. L'épaisseur du ruban est très faible devant l'épaisseur de diélectrique, donc il est possible de considérer que le milieu est homogène, et le mode de propagation sera de type TEM, figure (I.6).

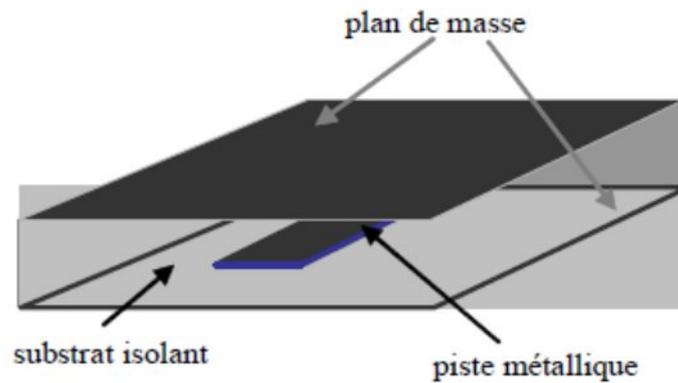


Figure I.6 ligne triplaque

4. Etude de la ligne micro-ruban [5] [6]

4.1 La structure

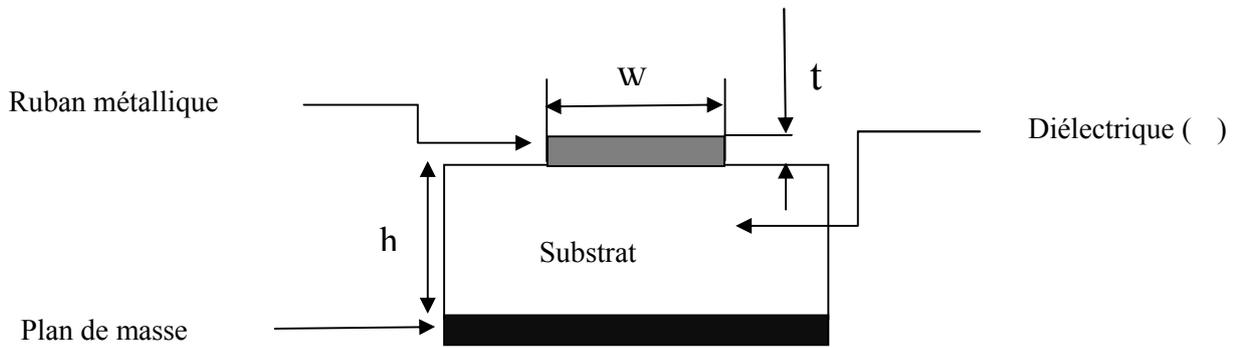


Figure I.7 vue en coupe d'une ligne micro-ruban

La ligne micro-ruban est caractérisée par :

- La permittivité relative de son substrat ϵ_r .
- L'épaisseur h du substrat, elle est petite par rapport à la longueur d'onde à transmettre.
- La largeur w du ruban qui détermine l'impédance caractéristique.
- L'épaisseur du ruban t comme indiqué sur la figure (I.6).

4.1. La permittivité effective

La propagation s'effectue dans le substrat et dans l'air, figure (I.8). Où les permittivités relatives des deux milieux de propagation sont différentes, c'est-à-dire que le milieu de propagation n'est pas homogène.

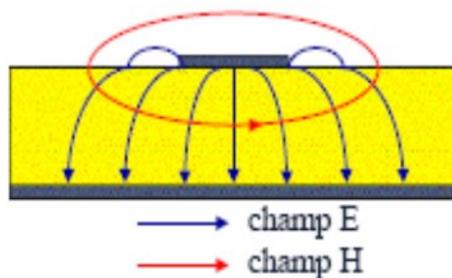


Figure I.8 ligne du champ d'une ligne micro-ruban

Ainsi la propagation ne peut se faire selon le mode TEM, cette ligne micro-ruban réelle se modélise par une ligne équivalente où la propagation s'effectuerait dans un milieu homogène de permittivité équivalente ϵ_{eff} , ou la propagation est quasi TEM.

Chapitre I

La permittivité équivalente est donnée en fonction de la permittivité relative et la géométrie de la ligne et h pour un substrat donné :

$$= \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} * \frac{h}{h} \quad (I.11)$$

4.2. Les paramètres caractéristiques de la ligne

La nouvelle permittivité diélectrique modifie la capacité. Appelons la nouvelle capacité linéique :

$$= \frac{C}{h} \quad (I.12)$$

La nouvelle vitesse de propagation est :

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{L \frac{C}{h}}} = \frac{h}{\sqrt{LC}} \quad (I.13)$$

La nouvelle impédance caractéristique est :

$$Z_0 = \frac{L}{C} = \frac{L}{\frac{C}{h}} = \frac{Lh}{C} \quad (I.14)$$

Avec : est l'impédance caractéristique dans le vide. $Z_0 = 120 \pi \approx 377 \Omega$ $Z_0 = 377 \frac{h}{\lambda_0}$

La longueur d'onde dans le micro-ruban s'exprime en fonction de la longueur d'onde dans l'aire, par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (I.15)$$

la longueur électrique est donnée par :

$$L_e = \frac{L}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (I.16)$$

L : la longueur de la ligne.

A partir de la relation (I.9) de Z_0 , on déduit que l'impédance caractéristique, la vitesse de propagation et la longueur d'onde sont en fonction de la géométrie de la ligne h / λ_0

4.3. Calcul de la permittivité diélectrique effective et de l'impédance caractéristique en fonction de la géométrie de la ligne et

Hammerstad et Jensen nous donnent ci-dessous l'expression de la permittivité effective et de l'impédance caractéristique [7] :

➤ Pour $h/b \leq 1$:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} * \left[1 + 12 \frac{h}{b} \right]^{-1} + 0.04 \left[1 - \frac{h}{b} \right] \quad (I.17)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \ln \left(\frac{8h}{b} \right) + 0.25 \frac{h}{b} \quad (I.18)$$

➤ Pour $h/b \geq 1$:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} * \left[1 + 12 \frac{h}{b} \right]^{-1} \quad (I.19)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{h/b} + 1.393 + 0.677 \ln \left(\frac{h}{b} + 1.444 \right) \right] \quad (I.20)$$

Ces expressions précises et efficaces pour le calcul de la permittivité diélectrique effective et l'impédance caractéristique [8] :

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} * \left[1 + \frac{10}{h/b} \right]^{-1} \quad (I.21)$$

D'où :

$$\left\{ \begin{aligned} & \epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} * \left[1 + \frac{10}{h/b} \right]^{-1} \\ & \epsilon_{eff} = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \ln \left(\frac{h}{b} \right) + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \ln \left(1 + \frac{10}{h/b} \right) \\ & \epsilon_{eff} = 0.564 \frac{h}{b} \end{aligned} \right.$$

Chapitre I

La précision pour ce modèle est de 0.2% pour $1 \leq \epsilon_r \leq 128$ et $0.01 \leq h \leq 100$

L'impédance caractéristique est donnée par :

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(1 + \frac{2}{\epsilon_r} \right) \quad (I.22)$$

Tel que :

$$Z_0 = 60 \sqrt{\epsilon_r} \left(\ln \left(1 + \frac{2}{\epsilon_r} \right) \right)$$

La précision de Z_0 est de 0.01% pour $1 \leq \epsilon_r \leq 10$ et 0.03% pour $10 < \epsilon_r \leq 1000$

4.4. Dimension d'une ligne micro-ruban en fonction de

Pour effectuer la synthèse de la ligne fournissant le rapport Z_0/h qui correspond à une impédance caractéristique Z_0 et une permittivité diélectrique ϵ_r . Wheeler [9] et Hammerstad [8] donnent les expressions suivantes :

➤ Pour $Z_0/h \leq 2$:

$$\frac{Z_0}{h} = \frac{8 \exp(\epsilon_r)}{\exp(2\epsilon_r) - 2} \quad (I.23)$$

Avec :

$$\epsilon_r = \frac{60}{Z_0/h} \left(\frac{Z_0/h + 1}{2} \right)^{0.23} + \frac{-1}{+1} \left(\frac{Z_0/h - 1}{+1} \right)^{0.11}$$

➤ Pour $Z_0/h \geq 2$:

$$\frac{Z_0}{h} = \frac{2}{\epsilon_r} \left(\epsilon_r - 1 \right) - \ln(2\epsilon_r - 1) + \frac{-1}{2} \ln(\epsilon_r - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \quad (I.24)$$

Avec :

$$\frac{60}{\sqrt{\quad}}$$

Ces relations sont données pour une précision de 1%.

5. Influence des dimensions du ruban sur la ligne

5.1. Influence de l'épaisseur du ruban [10]

L'épaisseur du ruban se traduit par effet de bord modifiant légèrement la répartition du champ.

Pour tenir compte de cet effet, on doit remplacer dans les formules et la largeur géométrique du ruban par une largeur équivalente un peu plus grande, on obtient les relations suivantes :

➤ Pour $W/h \leq 1$:

$$C = \frac{W}{2} \ln \frac{8h}{C} + 0.25 \frac{C}{h} \quad (I.25)$$

➤ Pour $W/h \geq 1$:

$$C = \frac{W}{h} + 1.393 + 0.677 \ln \left(\frac{W}{h} + 1.444 \right) \quad (I.26)$$

Avec :

$$\frac{C}{h} = \frac{W}{h} + \frac{1}{1 + \ln \frac{W}{h}} \quad \text{pour } \frac{W}{h} \leq 0.5$$

$$\frac{C}{h} = \frac{W}{h} + \frac{1}{1 + \ln \frac{W}{h}} \quad \text{pour } \frac{W}{h} \geq 0.5$$

Lorsque $\epsilon_r = 0$; la permittivité diélectrique effective est donnée par :

$$C = \frac{W}{h} - \frac{1}{4.6} \frac{W}{h} \quad (I.27)$$

5.2. Influence de la fréquence [5] [6]

Le mode TEM, l'impédance caractéristique et la permittivité effective sont indépendantes de la fréquence, la ligne n'est pas dispersive.

On peut cependant tenir compte de la dispersion, par une relation approchée affectant la permittivité effective :

$$\epsilon_{eff}(f) = \frac{\epsilon_{eff}(0)}{1 + (f/f_c)^2} \quad (I.28)$$

Avec :

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon_{eff}(0)}} \frac{1}{h}$$

$$= \frac{-5}{60} + 0.04$$

Si $f \ll f_c$, il n'est pas nécessaire d'effectuer la correction.

5.3. L'affaiblissement de la ligne micro-ruban

Le facteur d'affaiblissement est égal à la somme des pertes par effet joule et les pertes dans le diélectrique : $\alpha = \alpha_{j} + \alpha_{d}$

➤ L'affaiblissement par effet de joule [11]

- Pour $h/b < 1$:

$$\alpha_j = 1.38 \frac{32 - \frac{h}{b}}{32 - \frac{h}{b}} \quad (\text{dB/m}) \quad (I.29)$$

- Pour $h/b > 1$:

$$\alpha_j = (6.11)10^{-3} \left[\frac{1}{h} + \frac{1}{h} + \frac{0.667}{\frac{h}{b} + 1.444} \right] \quad (\text{dB/m}) \quad (I.30)$$

Avec :

Chapitre I

$$= 1 + \frac{h}{1 + \frac{1.25}{\log 2}}$$

$$= \frac{h}{1 + \frac{1.25}{\log 2}}$$

Avec : $\alpha = h$ pour : $\alpha > 1$

Ou $\alpha = 2$ pour : $\alpha < 1$

α : est la conduction du diélectrique.

➤ Affaiblissement dû au diélectrique [11]

- Si $\alpha/h < 1/2$:

$$= 4.34 \frac{-1}{(\alpha - 1)} \quad (\text{dB/m}) \quad (\text{I.31})$$

- Si $\alpha/h > 1/2$:

$$= 27.3 \frac{-1}{\alpha - 1} \quad (\text{dB/m}) \quad (\text{I.32})$$

α : tangente de l'angle des pertes du matériau définie par :

$$\alpha = \frac{\sigma}{\omega \epsilon}$$

Avec ϵ' et ϵ'' les parties réelle et imaginaire (respectivement) de ϵ ($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$).

L'affaiblissement dû au diélectrique est en général très inférieur à l'affaiblissement dû au métal. En ce qui concerne les pertes métalliques les formules obtenues ne tiennent pas compte de l'état de surface, les pertes réelles peuvent atteindre le double des valeurs théoriques.

➤ L'affaiblissement dû au rayonnement [5] [6]

Une ligne à diélectrique uniforme ne rayonne pas en principe. Dans la réalité, il existe toujours des discontinuités qui sont une source d'énergie rayonnée ;

L'énergie rayonnée est proportionnelle à : $\frac{1}{\sqrt{Z_0}}$

6. Conclusion

Actuellement, la technologie micro-ruban occupe une place privilégiée dans la réalisation de différents composants passifs. En effet, en jouant sur la forme et les dimensions géométriques de la ligne, il est aisé de concevoir des éléments passifs directement implémentés sur le circuit.

7. Bibliographie

- [1]- Thierry DITCHI, " Lignes de transmission", cours ; Sorbonne Université.
- [2]- F.BOUKCHICHE, "Etude de Structures Coplanaires à Métamatériaux et à Couche Magnétique", Thèse de doctorat de l'Université Jean MONNET de Saint ETIENNE et de l'Université MENTOURI de Constantine, Spécialité : Optique photonique et hyperfréquences, 30 novembre 2010.
- [3]- F.DE DIEULEVEULT, O.ROMAIN, Electronique appliquée aux hautes fréquences-principes et applications, 2^{ème} ED. Dunod, Paris, 2008.
- [4]- M. BELMENGUENAI, "Etude de la dynamique hyperfréquence de l'aimantation de nanostructures magnétiques à anisotropie perpendiculaire", Thèse de doctorat en sciences de l'Université Paris XI Orsay, 14 décembre 2004.
- [5]- Paul. F COMBES, "Micro-ondes, lignes, guides et cavités (cours et exercices)", Tome 1, Ed. Dunod, Paris, 1996.ISBN 2 10 002840 5.
- [6]- R. BADOUAL, CH MARTAIN, S JAQUET, "Les micro-ondes", Tome 1, 2^{ème} Edition, Masson, Pari Milan Barselon Bonn 1983, 1992 ISBN : 2-225-84023-7 ISSN : 0223-5285.
- [7]- E. O. HAMMERSTARD, "Equation for microstrip circuit design", in Proceedings of the European Microwave Conférence, Hamberg, Germany, 1975 , pp. 268-272.
- [8]- E. O. HAMMERSTARD and O. Jean, "Accurate models for microstrip computer-aided design", IEEE MTT-S, 1980, Digest, pp. 407- 409.
- [9]- H. Wheeler, "Transmission line properties of parallel strips separated by a dielectric sheet", IEEE Trans. MTT-13, 172-185.
- [10]- I. J. Bahl and R. Garg, "Simple and accurate formulas for microstrip with finite strip thickness", Proc. IEEE, 65, 1977, 1611-1612.
- [11]- R. A. Pucel, D. J. Masse, and C. P. Hartwig, "Losses in microstrip", IEEE Trans. MTT-16, June 1968, 342-350. Correction in IEEE Tans. MTT-16, Dec. 1968, p. 1064.

CHAPITRE II

Généralité sur la photodétection et les photodétecteurs

1. Introduction

Le photodétecteur est un composant à base de semi-conducteur. Il absorbe de l'énergie optique et la convertit en énergie électrique, qui se manifeste en photocourant. Il est très important dans la transmission optique et les systèmes de mesure. Au cours de ce chapitre on va présenter des généralités sur la photodétection, en précisant ces principes de base, aussi on va exposer la théorie générale des photodétecteurs avec les équations définissent les paramètres déterminant les performances du photodétecteur. Enfin on passera aux différents types de photodétecteurs et une petite comparaison entre les différents types de photodétecteurs.

2. La photodétection

La photodétection représente une fonction qui trouve sa place dans un grand nombre de systèmes professionnels au grand public. En 1905 Einstein a introduit la notion de photon en affirmant que lors des phénomènes d'émission ou d'absorption, la lumière présente sous forme de quantum d'énergie. Ces quanta sont assimilables à des particules et il leur a été donné le nom de photon [1]. La photodétection est un phénomène d'absorption dans un matériau de l'énergie lumineuse portée par les photons qui est transformée en énergie électrique portée par les électrons et les trous.

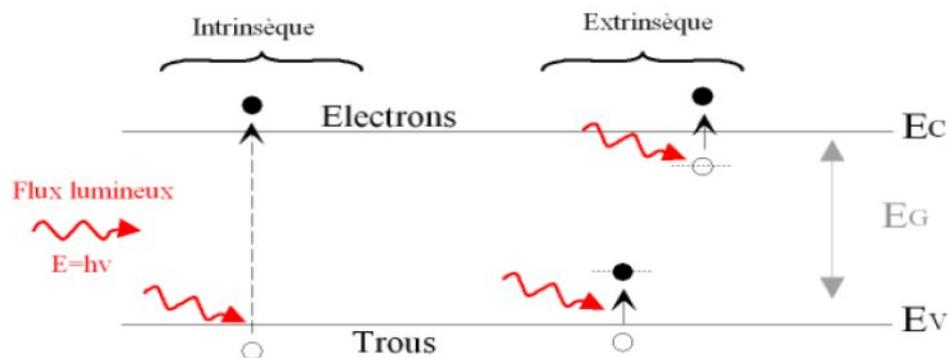


Figure II.1 Principe d'absorption de la lumière dans le cas de semi-conducteurs intrinsèque et extrinsèque.

Cette figure illustre le principe de base de la photodétection dans le cas d'un semi-conducteur intrinsèque et extrinsèque. L'absorption d'un photon possédant une énergie au moins égale à la bande interdite E_g caractérisant le semi-conducteur, permet de libérer un électron dans la bande de conduction E_c à la bande de valence E_v .

Tout d'abord, le photon doit posséder une énergie E_{photon} égale ou supérieur à la hauteur de la bande d'énergie interdite E_g du semi-conducteur pour faire passer l'électron de la bande de valence à la bande de conduction. Cela implique une

Chapitre II

longueur d'onde de coupure au-delà laquelle le matériau devient transparent à ce rayonnement. est déterminée par l'énergie de bande interdite E_g du semi-conducteur selon la relation suivante [2] :

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} \quad (II.1)$$

Où h est la constante de planck, $h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$ Js, c la longueur de l'onde dans le diélectrique et v la célérité, $v = 2,99725 \cdot 10^8$ ms⁻¹.

Le mécanisme de la photodétection est généré donc par une transition optique entre deux ensemble de niveaux quantiques.

3. Paramètres d'un photodétecteur

Un photodétecteur est un composant semi-conducteur ayant une capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique. Les principaux paramètres qui définissent le fonctionnement d'un photodétecteur sont le coefficient de réponse (sensibilité), le gain, le rendement quantique, la bande passante et la puissance équivalente de bruit.

Le coefficient de réponse R lie le photocourant I à la puissance lumineuse incidente P par la relation suivante:

$$R = \frac{I}{P} \quad (II.2)$$

Le flux de photon Φ arrivant sur la surface du semi-conducteur est défini par le nombre de photon atteignant la surface active par unité de temps à une longueur d'onde donnée. Il est exprimé par la relation suivante:

$$\Phi = \frac{P}{h\nu} \quad (II.3)$$

L'efficacité quantique ou le rendement quantique η est généralement défini comme le rapport : nombre de paires électron-trou générées sur le flux de photon incident.

Le taux de génération des paires électron-trou par unité de temps est donné par:

$$G = \eta\Phi = \eta\Phi = \eta P \frac{\lambda}{hc} \quad (\text{II.4})$$

Si on considère le gain photoélectrique g qui correspond au nombre de porteurs détectés par rapport au nombre des paires électron-trous photogénérés, le photocourant est donné alors par la relation suivante:

$$I = qgG = qg\eta \frac{\lambda}{hc} \quad (\text{II.5})$$

$$R = q \frac{\lambda\eta}{hc} g \quad (\text{II.6})$$

D'où λ : longueur d'onde, h : constante de Planck, c : la vitesse de la lumière, q : charge de l'électron et g : le gain du courant photoélectrique.

Les équations de base pour analyser la performance du détecteur sont bien connues et sont :

- La densité de courant pour les électrons.
- La densité de courant pour les trous.
- L'équation de continuité pour les électrons.
- L'équation de continuité pour les trous.
- L'équation de poisson.

4. Les différents types des photodétecteurs

Dans cette partie on va présenter brièvement les différents types de photodétecteurs ainsi que les principales notions physiques à l'origine de leur fonctionnement.

a) La photodiode PN classique

Une photodiode classique est une simple jonction PN polarisée en inverse afin d'obtenir une grande zone de charge d'espace ou zone de déplétion favorisant la photodétection. Le fonctionnement de la photodiode est illustré dans la figure II.2. les photons incidents, avec une énergie supérieure à celle de la bande interdite, sur la surface du composant créent des paires électron-trous dans tout le volume du matériau. La diffusion des électrons et des trous générés atteignent la ZCE (zone de charge d'espace) de la jonction avec une longueur de diffusion adéquate. Cependant, sous l'effet d'un champ électrique fort. Les paires électron-trou sont séparées et les porteurs minoritaires sont accélérés dans un côté pour devenir des porteurs majoritaires

dans l'autre côté, participant ainsi à la génération du photocourant. Ils peuvent se recombiner au cours de leur déplacement[3],[4].

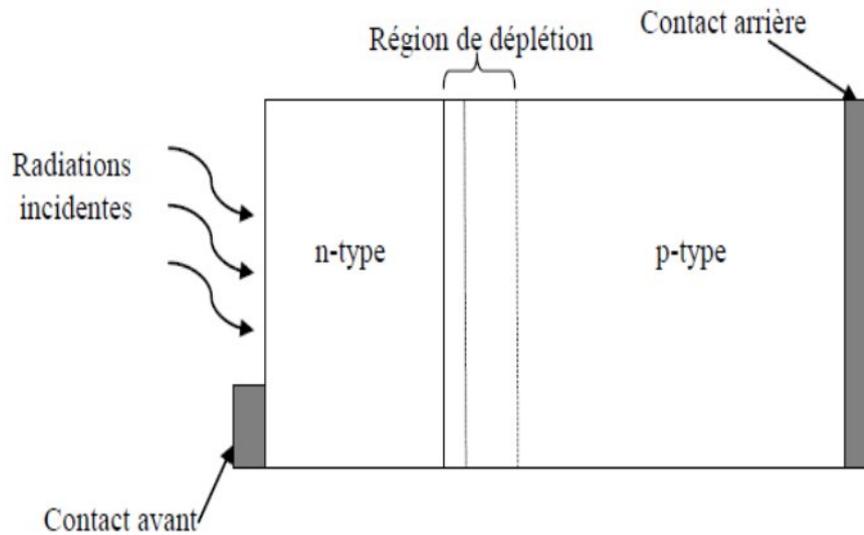


Figure II.2 la photodiode PN

La première évolution des photodétecteurs au début des années 60, s'est tournée vers l'augmentation de la zone d'absorption à l'aide d'une couche supplémentaire non dopée ou faiblement dopée, pour accroître la sensibilité : cette évolution a donné naissance à la photodiode PIN.

b) La photodiode PIN

La photodiode PIN est un composant semi-conducteur de l'optoélectronique. Elle est utilisée comme photodétecteur dans de nombreuses applications industrielles. Sa particularité vient de sa jonction composée d'une zone intrinsèque intercalée entre une région fortement dopée P et une autre fortement dopée N. [3], [5].

La figure II.3 montre les dispositions possibles pour le flux optiques et le courant électrique.

La géométrie colinéaire (flux optique et transport de charges colinéaires) présentée dans la figure II.3.a est employée le plus fréquemment. Elle est prise comme type de référence pour l'analyse des caractéristiques des photodiodes. La figure II.3.b représente la géométrie orthogonale (flux optique et transport de charges orthogonaux).

➤ **La photodiode PIN à éclairage vertical**

L'idée de cette structure est d'augmenter artificiellement la zone de charge d'espace, sous une polarisation inverse suffisante, toute la zone intrinsèque est soumise à un fort champ électrique quasi-uniforme et ainsi les porteurs photo-générés

atteignent rapidement la vitesse de saturation. Cette structure de photodiode a été utilisée très rapidement comme démodulateur optique micro-onde [6] à [7].

Dans ce type de composant, des temps de réponse très brefs sont recherchés pour pouvoir permettre des montées en débit pour les communications. De plus, la réponse en fréquence des photodiodes à zone de déplétion est limitée principalement par les effets de temps de transit des porteurs [8] et de la capacité de jonction de la diode.

➤ La photodiode PIN à éclairage latéral

Les structures à éclairage latéral permettent ce découplage optique-électrique. Elles permettent d'augmenter la bande passante tout en gardant une grande sensibilité par élimination de la dépendance du rendement quantique avec l'épaisseur de la zone d'absorption.

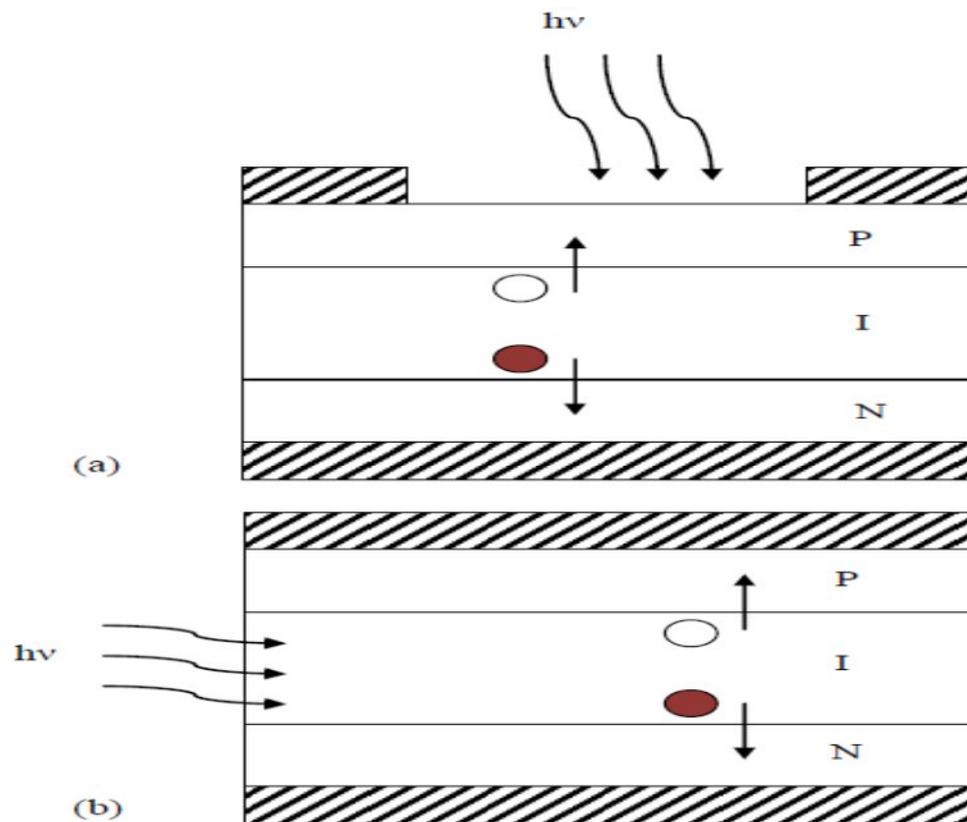


Figure II.3 géométries schématiques de photodiode PIN : flux optique et transport de charge (a) colinéaires et (b) orthogonaux

c) La photodiode à avalanche

les signaux optique, après propagation dans une fibre optique, sont généralement très faibles, par conséquent, le signal électrique délivré par les photodiodes requiert souvent une amplification. Le but de la photodiode à avalanche est d'obtenir une amplification interne du photocourant et ainsi augmenter la réponse du photodétecteur. Dans une photodiode à avalanche on obtient un champ fort en appliquant une tension inverse très importante à une structure PIN (figure II.3). il y a trois sources du courant transversant la diode :

- La génération primaire (par absorption d'un photon).
- La génération par impact due aux électrons.
- La génération par impact due aux trous.

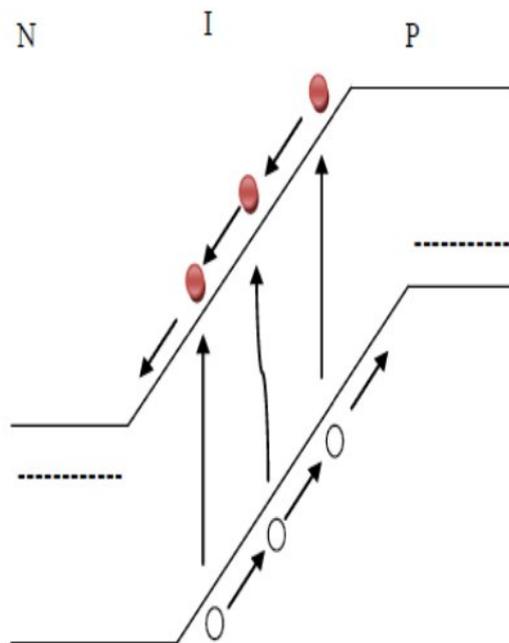


Figure II.4 Effet avalanche: une paire électron-trou photocréée génère d'autres paires par ionisation par impact.

La caractéristique principale de la photodiode à avalanche est son coefficient de multiplication M qui dépend des coefficients d'ionisation des électrons α et des trous β , il est décrit par l'équation [9] :

$$M = \frac{1}{L} \frac{\exp((\alpha_n - \alpha_p)L)}{\alpha_n - \alpha_n \exp((\alpha_n - \alpha_p)L)} \quad (\text{II.7})$$

Ce coefficient de multiplication peut atteindre 10^4 et permet à la photodiode à avalanche d'être très utile pour la détection de faibles signaux, notamment en sortie de fibre optique. Les inconvénients de ce composant sont liés à sa réalisation difficile, à la tension élevée nécessaire à la condition d'avalanche et à la nature aléatoire du mécanisme de gain qui est un phénomène bruyant. Signalons aussi que pour les systèmes de télécommunications par fibre optique modernes, l'intérêt de la photodiode à avalanche a tendance à diminuer à cause de l'apparition des amplificateurs à fibre dopée erbium (EDFA).

Les photodiodes à avalanche atteignent des fréquences de coupure relativement équivalentes à celle des photodiodes PIN classique. On peut citer les débits à 17GHz à gain unitaire, publié par Kagawa en 1993, avec une structure en InGaAs pour la zone d'absorption et InGaAsP-InAlAs pour la zone de multiplication. Elle est illuminée par la face arrière à $\lambda = 1,3\mu\text{m}$ avec un rendement quantique de 74% et un produit gain-bande maximum de 110GHz avec une bande passante d'environ 10GHz. Campbell présenta une structure avec une zone de multiplication en Si cette fois, éclairée sur la gamme $\lambda = 1,3 - 1,6\mu\text{m}$, qui atteignait une fréquence de coupure supérieure à 10GHz de gain unitaire et un rendement de 42%. Le produit gain-bande était estimé à environ 400GHz [9].

d) Le photodétecteur Métal-semi-conducteur (MSM)

La structure MSM est une structure constituée de deux électrodes schottky, qui souvent s'interpénètrent sous la forme d'un peigne interdigité, laissant entre deux contacts une surface libre de semi-conducteur qui constitue la zone active destinée à absorber la lumière. Pour cette raison, chaque contact a une caractéristique courant-tension similaire à celle d'une jonction classique, le photodétecteur MSM se comporte comme deux diodes en série placées en inverse l'une par rapport à l'autre. La figure suivante nous montre un exemple sur le MSM [10].

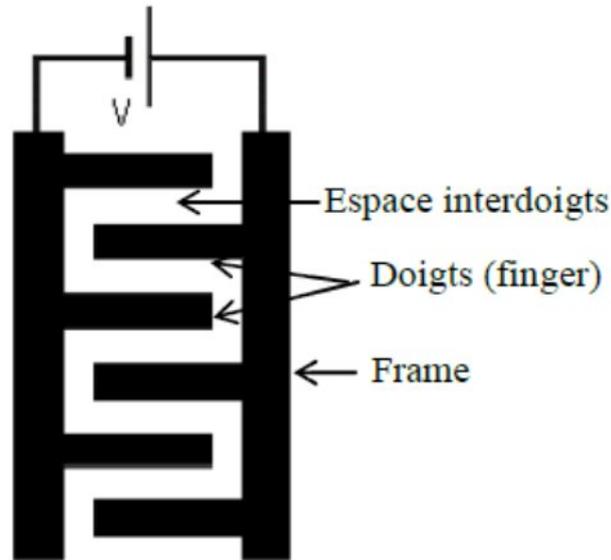


Figure II.5 : Structure d'une photodiode MSM.

e) Les photodétecteurs ultraviolets (UV):

La détection des rayonnements ultraviolets ($\lambda < 400$ nm) présente de nombreuses applications tant dans les domaines civils que militaires dont on peut citer:

- Les capteurs biologique et chimique : détection d'ozone, de polluants et d'agents biologiques.
- Les détecteurs de flamme : alarmes d'incendie, détection de panache de missiles, contrôle de combustion.
- Les communications optiques spatiales et inter satellitaires : transmissions sécurisées de données dans l'espace.
- La calibration des émetteurs et l'imagerie UV : instrumentation, mesure des UV d'origine solaire, études astronomiques.

Les photodétecteurs agissent pour l'essentiel comme des filtres passe-haut, et on les classe en détecteurs aveugles ou visible (visible Blinde) pour des longueurs d'onde de coupure comprises entre 400 et 280 nm, ou aveugles à la lumière solaire terrestre (solar blind), en supposant les UV coupés par l'absorption atmosphérique pour des longueurs d'onde de coupure typiquement inférieures ou égales à 280 nm [11].

f) Le phototransistor

Ce dispositif possède à la fois la fonction de photodétection et celle d'amplification, qui sont intégrées de façon monolithique [12]. Deux modes opératoires peuvent toutefois être mis en évidence: modes diode (pour la photodétection) et mode transistor (pour l'amplification). Le premier est obtenu en court-circuitant la base et l'émetteur, alors que le second est polarisé comme un transistor avec une polarisation collecteur-émetteur en direct, et un courant de polarisation injecté dans la base.

Chapitre II

Ainsi les phototransistors sont des transistors bipolaires dont la base est sensible au rayonnement lumineux (figure II.5); la base est alors dite flottante puisqu'elle est dépourvue de connexion. Lorsque la base n'est pas éclairée, le transistor est parcouru par un courant de fuite I_{ce0} . L'éclairement de la base conduit à un photocourant I_{ph} que l'on peut nommer courant de commande du transistor. Celui-ci apparaît dans la jonction collecteur-base sous la forme :

$$I_c = \beta \cdot I_{ph} + I_{ce0} \quad (\text{II.8})$$

Le courant d'éclairement du phototransistor est donc le photocourant de la photodiode collecteur-base multiplié par le gain du transistor. Sa réaction photosensible est donc nettement plus élevée que celle d'une photodiode (de 100 à 400 fois plus). Par contre le courant d'obscurité est important.

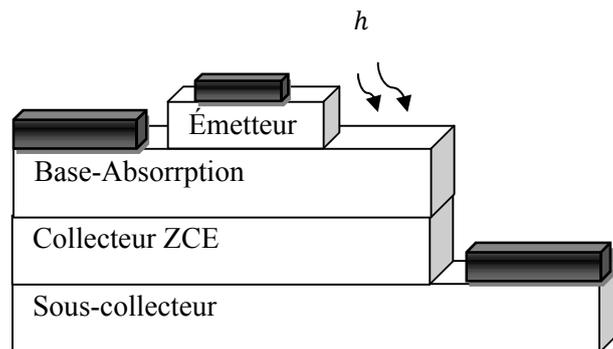


Figure II.6 : Schéma de la structure d'un phototransistor à Eclairage vertical.

La différence de gain entre les deux modes détermine le gain optique du phototransistor. Le phototransistor offre ainsi un courant électrique de sortie élevé avec une sensibilité amplifiée par l'effet de transistor[13]. L'avantage du phototransistor est lié, d'une part à la possibilité d'intégration, et d'autre part, à la fonction du mélangeur opto-électronique[14], [15]. Cela explique ses tentatives applications dans des réseaux radio sur fibre [16], [17].

5. Exigences et qualités principales des photodétecteurs

Les performances d'un système de communication à liaison optique de type numérique ou de type optique/radiofréquence dépendent en partie de celles du photodétecteur utilisé. Ce composant constitue un élément clé, il intervient grâce à la puissance de seuil qu'il

peut détecter et au bruit qu'il introduit. Pour cela, la conception d'un tel composant est soumise à des contraintes sévères. Les principaux critères dont il faut tenir compte sont [2]:

- Un bon coefficient de réponse à la longueur d'onde de fonctionnement (autour de 0,85-1,3 et 155 μm) : il s'agit de concevoir des photodétecteurs qui puissent fournir un fort courant électrique pour une puissance optique donnée. Cela signifie que le rendement quantique, donc la sensibilité, doit être élevée.
- Une bande passante convenable : pour pouvoir augmenter le débit des informations, il est indispensable de réaliser des composants larges bandes, avec des temps de réponse très réduits.
- Un bruit minimum : le bruit introduit par le photodétecteur doit être faible. Le courant d'obscurité doit être négligeable par rapport au photocourant.
- Reconstituer le signal original avec la plus grande fidélité : si on injecte dans le composant de fortes puissances optiques, les charges photocréées s'accumulent et saturent le photodétecteur. Afin de garder un comportement linéaire, ce problème doit être pris en compte.
- Stabilité des performances du photodétecteur doivent rester stables au cours du temps et stable en température. Il doit pouvoir fonctionner durant plusieurs années.

6. Comparaison entre structures photoconductrices

Après avoir exposé les différents types de photodétecteurs et les caractéristiques déterminant leurs performances, il semble intéressant de donner une comparaison entre eux. Dans ce but, nous avons regroupé dans le tableau suivant une comparaison des différentes caractéristiques des principaux photodétecteurs. On peut dire que le photodétecteur APD a une bonne sensibilité, cependant il est difficile de fabriquer un dispositif de qualité à cause de sa structure compliquée. Les photodiodes PIN et APD ont un avantage en terme de coefficient de réponse et sont largement utilisées dans les systèmes courants ce qui n'est pas vrai pour les photodétecteurs MSM bien qu'ils aient une structure plus simple et sont plus facile à fabriquer. La capacité est un facteur limitant la bande passante des photodétecteurs à travers la constante de temps RC. La faible capacité du photodétecteur MSM reste particulièrement attractive pour les applications ultra-rapide [18].

Chapitre II

Type de photodétecteur	Photoconducteur GaInAs	MSM AlInAs/GaInAs	PIN GaInAs	APD Photodiode à avalanche
Facilité de fabrication	***	**	***	*
Facilité d'intégration	***	***	**	*
Bruit à faible débit (<1Gb/s)	****	**	***	**
Bruit à fort débit (>1Gb/s)	**	***	***	****
Rapidité	**	***	****	***
Fiabilité	***	***	****	***
Courant d'obscurité	*	****	****	**
Capacité de jonction	***	****	**	**
Côût potentiel	***	***	***	*
Maturité technologique	*	**	****	**

**** : Très bon *** : Bon ** : Moyen * : Médiocre

Tableau II.1 : Tableau comparatif entre différents photodétecteurs [17].

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé le principe de base de la photodétection. Puis nous avons exposé d'une façon générale les différents types de photodétecteurs afin d'avoir une idée claire sur leur structure et fonctionnement. Aussi une brève comparaison est présentée pour mettre en évidence les caractéristique de chacun. Pour les applications micro-ondes, les photodétecteurs les mieux adaptés compte tenu des valeurs de fréquence de copure semblent être la photodiode PIN et le photodétecteur MSM [3]. Ce dernier de par sa structure planaire, présente de plus, un avantage certain pour l'intégration monolithique.

8. Bibliographie

- [1]- J.P. Maury, "une histoire de la physique sans les équations", in Vuibert, 2-7117-5269-0, Paris, Octobre 2000.
- [2]- Z.Sidi Ali MEBAREK , "Télécommunications Optiques, Sources, Fibres et Détecteurs", Office des publication Universitaire (O.P.U) ; Algérie, 2001 ISBN: 9961.0.0497.3.
- [3]- I.S. ASHOUR, "Etude de photodétection Metal-Semiconducteur-Metal pour les applications micro-ondes", Thèse de Doctorat de l'Université des sciences et technologies de Lille, Spécialité: Electronique, 25 novembre 1994.
- [4]- F.JOURNET, "Modélisation de photodiodes PIN pour un Fonctionnement enHyperfréquence sous forte puissance", Thèse de Doctorat de l'Université des sciences et technologies de Lille, Spécialité: Electronique, 27 Mars 1996.
- [5]- Diodior Decoster, Joseph Herari, "Détecteur optoélectronique", Lavoisier 2002.
- [6]- G. Lucovsky, M.E. Lasser, R.B. Emmons, "Coherent light detection utilizing solid state photodiodes", in electro-chemical society spring meeting, Electronics Div Abstract, p.284.285, May 1962.
- [7]- L.K. Anderson, "The pin junction photodiode as a detector of light modulated at microwave frequencies", in 1963 international solid-state circuits conf. Digest technical paper Philadelphia, USA, pp114-115, Feb.1963.
- [8]- W. Gartner, "Depletion layer photoeffects in semiconductors", in physical review, vol.116, p84-87, 1959.
- [9]- J.C. Compbell, "High-Gain Bandwith Product Si/InGaAs Avalanche photodetectors", in conference on optical fibre communication technical digest, ofc'97, p35-36, 16.21Feb 1997.
- [10]- Emmanuel Rosencher, Borge Venter-Optoélectronique, 2^{ème} édition Dunod.
- [11]- G. HARZALLAH, "Etude et modélisation d'un photodétecteur MSM à base de ZnO", Thèse de doctorat en Microsystème et instrumentation, Présentée à l'Université Mentouri à Constantine.
- [12]- H. KAMISTUNA, Y.MATSUOKA, S.YAMAHATA, N. SHIGEKAWA, "Ultraligh-Speed InP/InGaAs DHPTs for OEMMICs", IEEE Transaction on Microwave Theory an techniques, vol.49, n° 10, pp.1921-1925, 2001.
- [13]- M. MULLER, M. RIET, C. FORTIN, S. WTHITSOONTHORN, J. D'ORGIVAL, C. GONZLEZ, "Millimetrewave InP/InGaAs photo-HBT and its application to a double-stage cascade optoelectronic mixer", International Topical Meeting on Microwave photonics, MWP' 02, pp.345-348, 2002.
- [14]- Y. BESTER, J. LASRI, V. SIDOROV, A.J. SEEDS, A. MADJAR, "An integrated heterojunction bipolar transistor cascade opto-electronic mixer", IEEE transactions on Microwave Theory and Technique, vol.47, n° 7, pp. 1358-1364, 1999.

Chapitre II

- [15]- M. MULLER, S. WITHITSOONTHORN, M. RIET, J.L. BENCHIMOL, C. GONZALEZ, "Millimetrewave InP/InGaAs photo-HBT and its application to optoelectronic integrated circuits, IEICE Transaction on Electronics, vol.E86-C, n° 7, pp.1299-1310, 2003.
- [16]- C.GONZALEZ, M. MULLER, J.L. BECHIMOL, M. RIET, P. JAFFRE, P. LEGAUD, "HBT Phototransistor for remote up conversion in hybrid fibre radio ditribution systems", European Conference on optical communication, ECOC'00, pp.103-104, 2000.
- [17]- S. WITHITSOONTHORN, "Photodiode UTC et Oscillateur differential.
- [18]- S. DEMEGUEL, "Photodiodes Rapides à Adaptateur de Mode Intégré pour les Liaisons Optiques/Radiofréquences à 60GHz et les Transmissions Numériques à 40Gb/s", Thèse de doctorat de l'Université de ROUGEN, Spécialité : Optoélectronique 26 octobre 2001.
- [19]- J. KIM, "high-performance MSM photodetectors and optical receiver for optical communication", Thèse de doctorat, Spécialité: Electronique, Université de Maryland, Etat-Unis, 2001.
- [20]- O. RABII, "Etude des photodétecteurs PIN-Guide et MSM intégré à guide optique pour des applications en ondes Millimétriques" Thèse de doctorat de l'Université des sciences et Technologies de Lille, Spé

CHAPITRE III

Performances des photodétecteurs PIN, APD et MSM ET simulation

Partie I

Performances des photodétecteurs PIN et PDA

1. Introduction

Au cours du chapitre précédent, on a exposé des généralités sur la photodétection, aussi on a cité les différents types des photodétecteurs et dans cette partie il est nécessaire de détailler les photodiodes PIN et les photodiodes à avalanche (PDA) et de bien comprendre leur mécanisme de création afin de pouvoir les estimer et de donner leurs schémas équivalent qu'on va les modéliser.

Avant tous, on va rappeler les caractéristiques du photodétecteur.

2. Caractéristiques du photodétecteur [1][2]

Un photodétecteur est caractérisé par :

- Le rendement quantique (η) : représente le rapport du nombre de paires de porteurs « photocrées et collectées » au nombre de photons incidents. Il ne peut pas être supérieur à 1 et croît avec l'épaisseur de la zone absorbante. Il est souvent compris entre 0,5 et 0,9 et pour une photodiode idéale il est égal à 1.
- La sensibilité (S) : définit le rapport du photocourant I_p au flux énergétique (ou puissance optique P_{opt}) reçu(e) et s'exprime en (A/W).
- La bande passante : permet de savoir si le courant peut suivre une variation brusque du flux de photons, et quel est le facteur de proportionnalité entre le temps de montée ou de descente du photocourant et ceux du flux lumineux.
- Le bruit de photodétecteur : certains électrons du courant utile peuvent être générés sans qu'un photon n'ait été absorbé. Ils s'ajoutent aux photoélectrons et parasitent le courant en ajoutant des artefacts.
- Le coefficient d'absorption α : il détermine le rendement du photodétecteur. Ce coefficient dépend du matériau utilisé et de la longueur d'onde.

Le rendement quantique et la sensibilité sont reliés par les relations suivantes, avec e représentant la charge élémentaire de l'électron, h la constante de Planck, λ la longueur d'onde et c la vitesse de la lumière :

$$\eta = \frac{I_p / e}{P_{opt} / h \cdot \nu} \quad \text{et} \quad S(\lambda) = \frac{I_p}{P_{opt}} = \eta \cdot \frac{e \cdot \lambda}{h \cdot c} \quad (\text{III.1})$$

Le courant crée est proportionnel à la puissance lumineuse, ce qui signifie la puissance du signal électrique est proportionnelle au carré de la puissance optique. Il s'agit d'une détection quadratique.

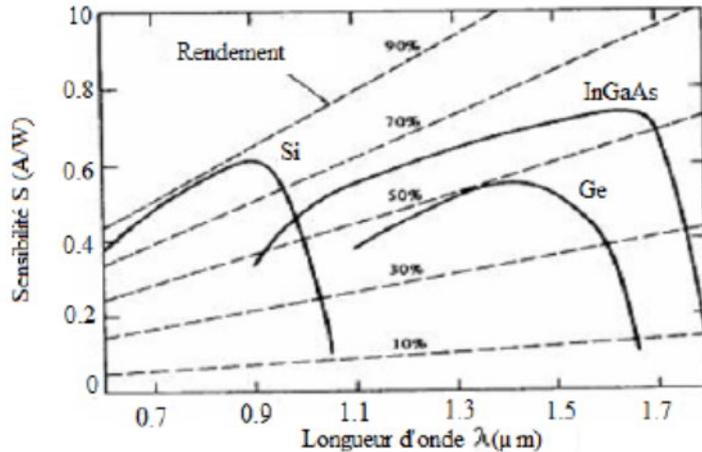


Figure III.1 : Courbes de sensibilité et de rendement selon les longueurs d'onde pour divers matériaux.

La sensibilité S d'un matériau augmente avec λ jusqu'à la fréquence de coupure où elle s'écroule brusquement. Il apparaît donc pour chaque matériau une longueur d'onde pour laquelle la sensibilité est maximale. On observe que les hétérostructures III-V comme le GaInAs sont les plus convenables pour les transmissions à 1,55 μm de longue portée.

Dans ce qui suit nous allons étudier les deux types de photodétecteurs : les photodiodes PIN et les photodiodes à avalanche (PDA).

3. La photodiode PIN [3][2]

Pour effectuer la photodétection, en évitant les recombinaisons des paires électron-trou, il faut que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles, assimilable à une zone de charge d'espace d'une jonction PN, encore appelée zone déplétée. Cette dernière doit être large pour permettre un bon rendement quantique, d'où l'intérêt de la photodiode PIN, où une région intrinsèque, lorsque la photodiode est polarisée en inverse, où règne un champ électrique qui sépare les porteurs. La zone traversée par la lumière (P ou N) doit être faible épaisseur, et recouverte d'une couche antireflet qui améliore le rendement quantique externe, et qui protège le matériau.

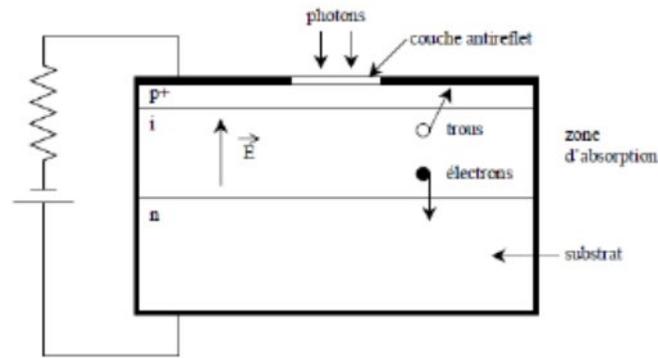


Figure III.2 : Structure d'une photodiode PIN.

Une telle photodiode est caractérisée par des paramètres dépendant du matériau et de la structure qui sont la sensibilité, le courant d'obscurité, le temps de réponse...

Dans la jonction de la photodiode PIN s'établit un courant inverse, d'expression :

$$I = I_{\text{obs}} + I_{\text{photo}} \quad (\text{III.2})$$

Avec I_{obs} courant d'obscurité, qui circule dans la jonction en l'absence d'éclairement. Ce courant ne provient donc pas des photons transmis par la fibre. Il peut avoir des origines multiples : génération thermique dans la zone intrinsèque, courants de surface, courants de fuite. Ce courant augmente avec la température et la tension de polarisation.

Et I_{photo} photocourant proportionnel à la puissance optique P, exprimé par :

$$I_{\text{photo}} = S \cdot P \quad (\text{III.3})$$

Où S est la sensibilité définie précédemment.

Une autre caractéristique de la photodiode, est son temps de réponse, qui doit être très bref. Lorsque la structure est verticale, c'est-à-dire que l'éclairement se fait par le haut, le temps de réponse limite l'utilisation de la photodiode aux systèmes à 10Gbit/s. Pour augmenter la fréquence de coupure, il est nécessaire de travailler avec des photodétecteurs éclairés par la tranche. Ce temps de réponse est limité par deux facteurs principaux :

- La capacité de jonction : d'autant plus réduite que l'on élargit la zone d'absorption.
- Le temps de transit : diminue si on rétrécit cette zone.

Pour améliorer le temps de réponse un compromis doit être fait, en augmentant la tension de polarisation inverse qui permet de réduire la capacité et le temps de transit.

3.1. Bruit des photodiodes PIN [4]

Le signal électrique émis par la photodiode n'est pas parfait, il est plutôt affecté des bruits qui contribuent à la dégradation des systèmes de communication.

On trouve entre autre :

a. Le bruit quantique (bruit photonique, de grenaille ou encore bruit de schottky)

C'est un bruit qui résulte de la nature corpusculaire du photocourant et du caractère aléatoire de la création des paires électron-trou. Ce bruit proportionnel à la puissance optique reçue par la photodiode est inévitable. Son expression s'écrit sous la forme :

$$\langle I^2 \rangle = 2 \cdot e \cdot S \cdot P \cdot B \quad (\text{III.4})$$

Où e la charge élémentaire de l'électron, S la sensibilité, P la puissance optique reçue par la photodiode et B la bande passante du signal.

b. Bruit d'obscurité

En l'absence de rayonnement, les photodiodes produisent un bruit (dit d'obscurité) qui dépend du matériau, de la température et la technologie utilisés. Il est associé au courant d'obscurité. La variance de ce bruit a pour expression :

$$\langle I^2 \rangle = 2 \cdot e \cdot I \cdot B \quad (\text{III.5})$$

Avec e la charge élémentaire d'électron, B la bande passante et I le courant d'obscurité.

c. Bruit thermique

Aux bruits précédemment cités, s'ajoute une source de bruit thermique due aux différentes résistances contenues dans la photodiode.

Le schéma équivalent de la photodiode PIN polarisée en invers est donné par la figure suivante :

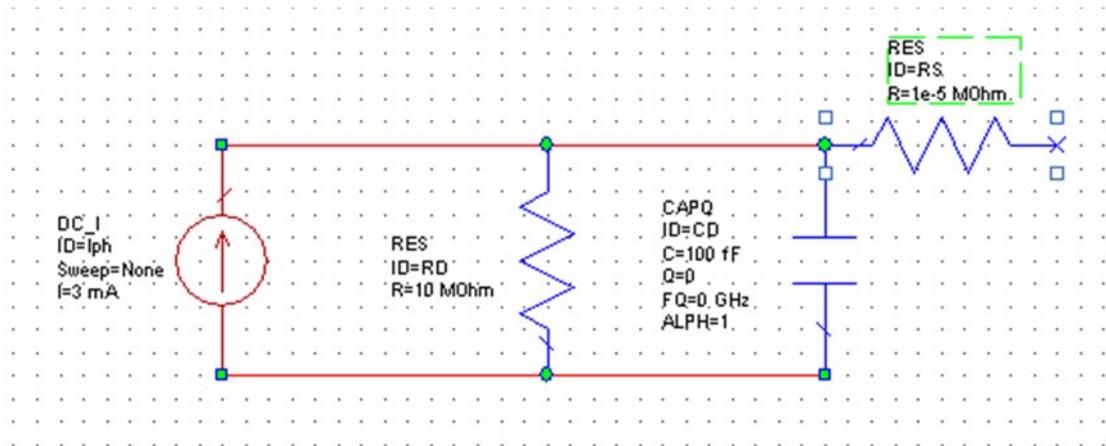


Figure III.3 : Schéma équivalent de la photodiode PIN polarisée en inverse.

R_D : Résistance de la jonction (10 à 10^4 M Ω)

C_D : Capacité totale de la diode (jonction et boîtier) (2 à 10pf)

R_s : Résistance série (10 à 50 Ω)

Chaque résistance de ce schéma équivalent se comporte comme une source de bruit thermique. En négligeant la résistance série, le bruit thermique s'écrit :

$$\langle I \rangle = \frac{4KT_B}{R} \quad (III.6)$$

K : la constante de Boltzmann

T : température absolue en degré Kelvin

d. Bruit total introduit par la photodiode PIN

Il est dû à la contribution du bruit thermique et du bruit quantique en faisant l'hypothèse que la résistance série est nulle, soit :

$$\begin{aligned} \langle I \rangle &= \langle I \rangle + \langle I \rangle + \langle I \rangle \\ \langle I \rangle &= 2 \cdot e \cdot B \cdot I + I + \frac{4KT_B}{R} \end{aligned}$$

4. Les photodiodes à avalanche PDA [4] [5]

Afin que le rapport signal sur bruit soit suffisamment important, l'idée d'utiliser le phénomène de multiplication interne pour qu'un photon incident n'engendre plus un seul photo-électron, mais plusieurs a été soulevée, ceci pour augmenter la puissance du signal électrique correspondant à une puissance optique incidente donnée.

En faisant croître le champ électrique dans la jonction PIN, l'énergie des porteurs s'élève, jusqu'au point d'ioniser un atome en cas d'impact avec celui-ci. Des ionisations en chaîne se produisent alors et les porteurs se multiplient. Ce photodétecteur à gain interne est appelé photodiode à avalanche (en anglais APD). Le gain de multiplication par ionisation par impact, appelé aussi facteur de multiplication M , est le rapport entre le nombre moyen de porteurs secondaires créés par ionisation et le nombre de porteurs primaires provenant de la photodétection. La valeur du courant relatif au nombre de photons absorbés devient :

$$I = M(v) \cdot S(\lambda) \cdot P \quad (\text{III.7})$$

Le gain augmente avec la différence de potentiel appliquée, mais est limité à une valeur maximale. Si le champ devient trop fort, il y a risque de claquage. Cette valeur limite de tension dépend du matériau et la structure utilisée.

Tout comme pour les photodiodes PIN, il existe plusieurs structures possibles. Voici à titre d'exemple le cas d'une structure dans le Silicium. Elle résulte d'un compromis entre une zone d'absorption large, et une jonction très abrupte pour obtenir un très fort champ électrique. C'est le principe de la structure $p\pi n$ (Figure III.4).

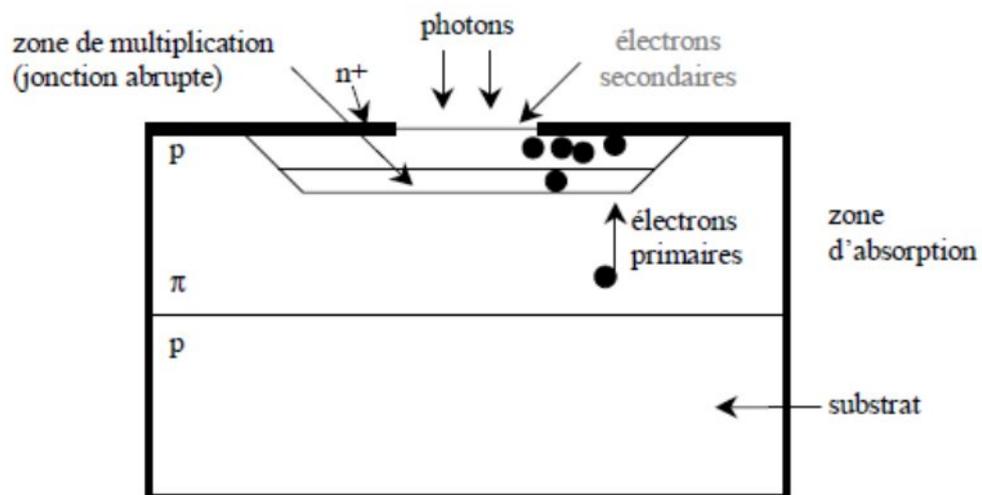


Figure III.4 : Structure d'une photodiode à avalanche $p\pi n$.

Chapitre III

L'absorption a lieu dans une zone large et peu dopée, dite π et la multiplication a lieu dans la jonction abrupte pn. En outre, pour une tension inverse élevée, la zone de charge d'espace s'étend dans la zone π , dont la résistivité va augmenter avec la tension. Ce principe introduit un effet stabilisateur : le champ électrique et le gain augmentent lentement, ce dernier peut atteindre de fortes valeurs tout en le commandant avec précision. Il est plus facile d'éviter le claquage.

Le courant d'obscurité observé, I_{obs} , est plus important dans une photodiode en régime d'avalanche, mais il reste en général inférieur au gain, M , multiplié par le courant d'obscurité non multiplié. En effet, toutes les composantes de celui-ci ne subissent pas le phénomène d'avalanche.

Le courant débité par la PDA vaut :

$$I = M \cdot S \cdot P + I_{\text{obs}} \quad (\text{III.8})$$

La rapidité est affectée par le phénomène d'avalanche. Elle est donc inférieure à celle des photodiodes PIN, à cause du temps de multiplication, mais reste élevée (de l'ordre de la nanoseconde).

Les mêmes bruits que ceux des photodiodes PIN affectent les photodiodes PDA. Il faut noter que le bruit quantique est également multiplié par le gain M . De plus, chaque porteur primaire ne donne pas naissance à un même nombre m de porteurs secondaires. Cette fluctuation de m donne naissance à un bruit supplémentaire [6].

5. Photodiodes MSM (METAL-SEMI-CONDUCTEUR-METAL) [7]

Une photodiode métal-semi-conducteur-métal (MSM PD) ou photodiode à barrière Schottky est réalisée à partir de deux contacts Schottky sur une même face de semi-conducteur (fig.III.5).

Chaque contact métal-semi-conducteur se comporte comme une diode Schottky. La photodiode MSM est donc constituée de deux diodes Schottky en série placées en inverse l'une par rapport à l'autre.

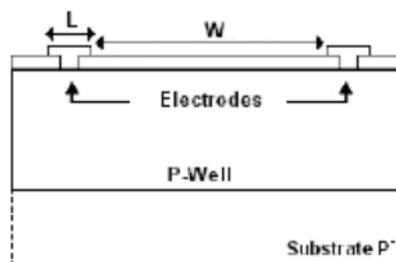


Figure III.5 : Vue en coupe d'une photodiode MSM.

5.1. Théorie de la photodiode Schottky

Sous polarisation, l'une des diodes étant forcément en inverse, le courant d'obscurité passant à travers la structure est très faible et, dans la mesure où les deux contacts Schottky sont identiques, la symétrie du composant donne lieu à une caractéristique globale $I(V)$ symétrique se résumant à la caractéristique de la jonction métal-semiconducteur en inverse. La figure III.6 montre une caractéristique courant-tension typique d'une photodiode à barrière Schottky.

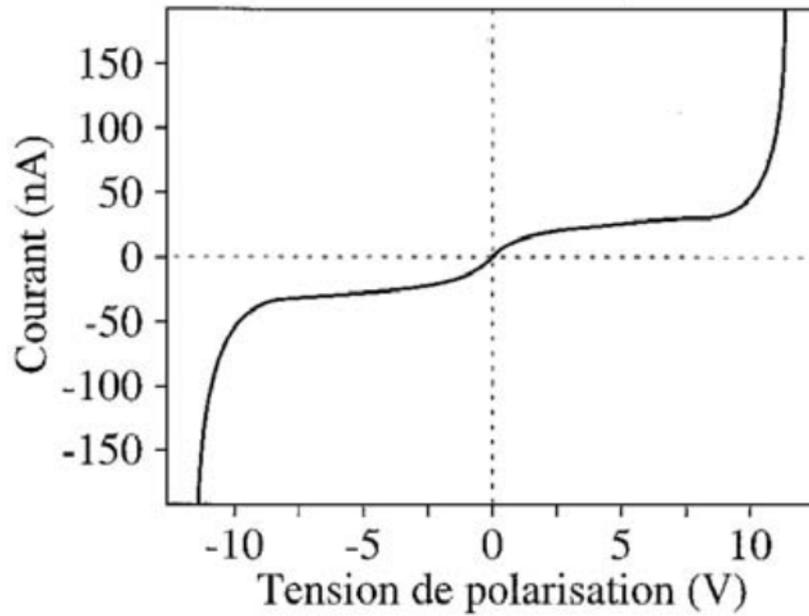


Figure III.6 : Caractéristique courant-tension typique d'une photodiode à barrière Schottky [8].

La figure III.7 présente une vue en coupe de la structure physique d'une photodiode MSM composée d'un barreau de semi-conducteur de type P et de deux contacts Schottky. Elle présente également la répartition des densités de charges dans le métal et dans le semi-conducteur ainsi que le champ électrique et la structure de bande correspondante sous une tension de polarisation V .

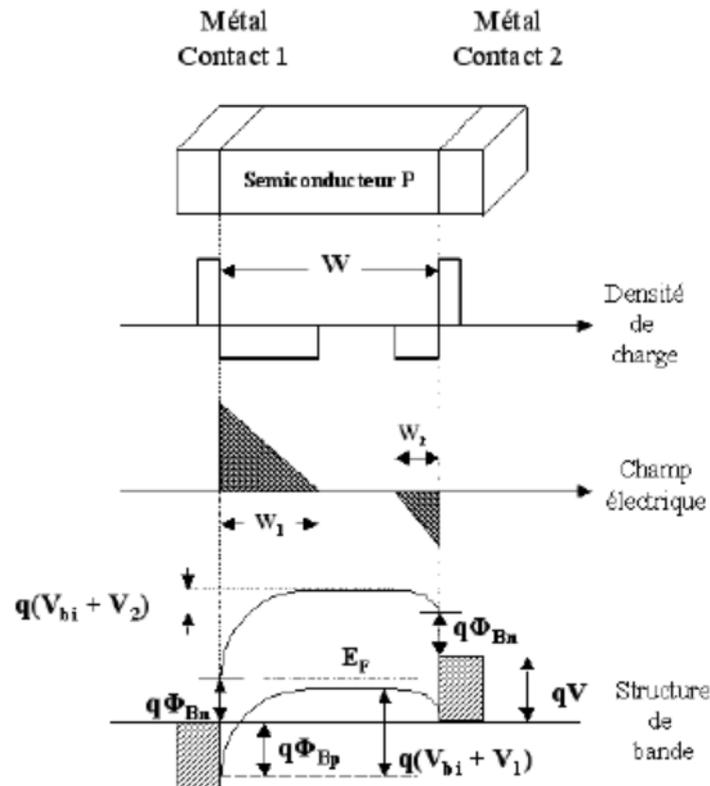


Figure III.7 : structure d'une MSM-PD. De haut en bas : Vue en coupe de la structure physique du photodétecteur, Répartition des densités de charges, Champ électrique sous polarisation, Structure de bande correspondante sous polarisation V .

Si la tension de polarisation en inverse est suffisamment élevée, la zone entre les électrodes est complètement désertée ($d = W_1 + W_2 = W$) et il y apparaît par conséquent un champ électrique. Sous éclaircissement, lorsqu'un photon est absorbé par le semi-conducteur, une paire électron-trou est créée puis collectée par le champ électrique afin de créer un courant photoélectrique. Ce photocourant dépend essentiellement de la géométrie de la photodiode et de la tension appliquée à ses bornes (III.8).

$$I = (1 - R) \frac{W}{L + W} \frac{e}{h \cdot \nu} P [1 - \exp(-\alpha \cdot d)] \quad (III.9)$$

$$d = \frac{2\varepsilon}{eN} (V - V_0) \quad (III.10)$$

R est le coefficient de réflexion du flux optique incident à l'interface air-semi-conducteur, α le coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde pour un matériau donné, $W/(W + L)$ l'effet d'ombre des électrodes et V_0 la barrière de potentiel due au contact Schottky, d l'épaisseur de la couche d'absorption des photons (ZCE).

Chapitre III

L : Longueur des doigts.

NA : Nombre d'atome accepteurs intervenant dans le dopage d'un semiconducteur (cm^{-3}).

Typiquement, les photodiodes MSM ont une structure interdigitée de manière à conserver un espacement inter électrode faible afin d'avoir des temps de réponses court tout en conservant une surface photosensible suffisante (fig.III.9). En effet, en fonctionnement normal, il est nécessaire que la zone entre les électrodes soit totalement dépeuplée afin de favoriser l'absorption des photons d'une part, et obtenir un champ électrique suffisamment élevé pour obtenir la polarisation en inverse de la jonction métal-semi-conducteur le plus rapidement possible. D'autre part, afin de bénéficier de la non-linéarité de la caractéristique en inverse. Le fait de rapprocher les électrodes de contact permet d'augmenter le champ électrique pour une même tension appliquée, de réduire le temps de transit des porteurs photogénérés entre ces contacts mais diminue fortement la sensibilité de la photodiode à cause de la zone d'ombre introduite par celles-ci.

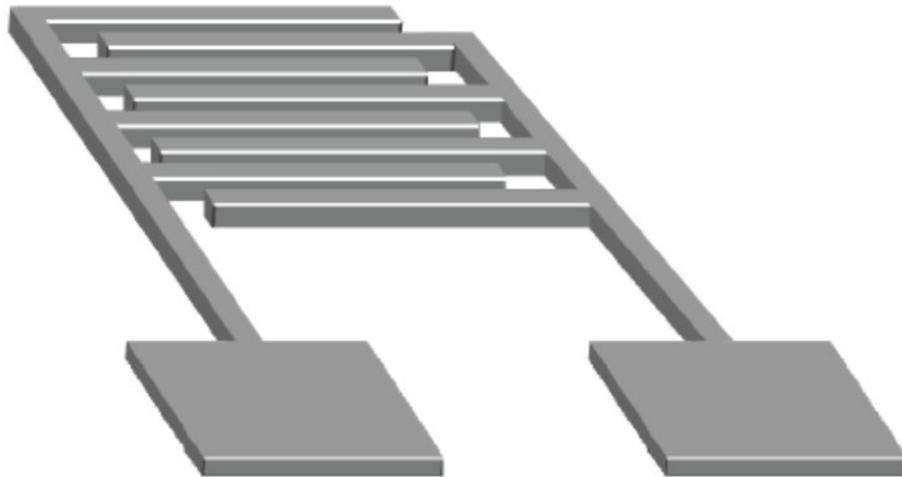


Figure III.8 : Exemple de structure MSM interdigitée.

La figure III.10 représente le circuit équivalent d'un PDMSM sous puissance optique modulée [9], d'où :

- I : le photocourant du PDMSM.
- C : la capacité intrinsèque du PDMSM.
- R : la résistance intrinsèque du PDMSM.
- R : la résistance de doigt.
- C : la capacité des plots.
- L et C : sont le fil de connexion.

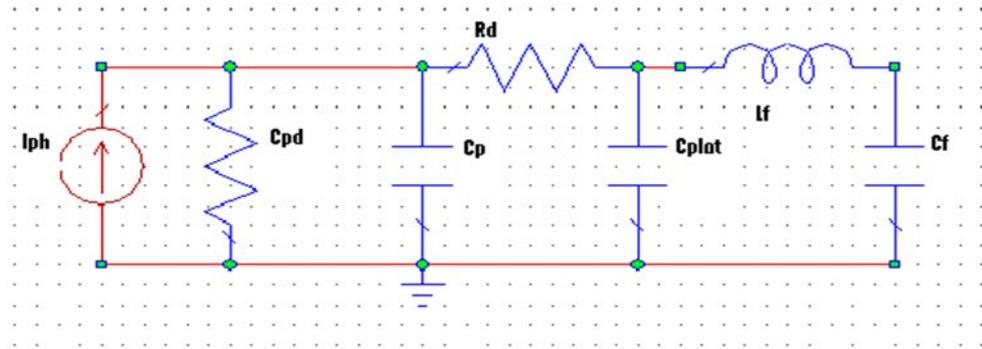


Figure III.9 : Schéma équivalent de la PDMSM.

Le tableau suivant donne les valeurs typiques des éléments du PDMSM [10] :

composant	Valeur typique
C	10 – 500 fF
R	10 – 10 Ω
R	1 – 100 Ω
C	10 – 100 fF
L	Quelques dizaines de pH
C	Quelques fF

Tableau III.1 : Valeurs typiques des éléments du circuit équivalent du PDMSM.

Partie II : Simulation

1. Introduction

Cette partie représente la partie principale de ce projet, on va intégrer les différentes photodiodes étudiées précédemment et ses effets sur la qualité du signal dans un système de transmission optique.

Les différentes simulations sont réalisées avec le logiciel COMSIS (COMmunication System Interactive Software) et le AWR Design Environment.

Simulation à l'aide du logiciel AWR

2. Présentation du logiciel AWR DESIGN (Applied Wave Research)

Le AWR Design Suite de l'environnement comprend trois outils puissants qui peuvent être utilisés pour créer un système d'intégration et RF ou environnement de conception analogique: Système visuel Simulator™ (VSS), Microwave Office (MWO), et le logiciel de bureau analogique. Ces puissants outils sont entièrement intégrés dans la suite de conception de l'environnement AWR et vous permettent d'incorporer les conceptions de circuits dans la conception des systèmes sans quitter l'environnement de conception AWR. Ce guide contient des informations pour MWO et VSS uniquement.

3. Le cas de la ligne coplanaire (CPW)

On réalise le schéma suivant à l'aide du logiciel AWR, sachons que la permittivité électrique de la ligne CPW = 12.9 :

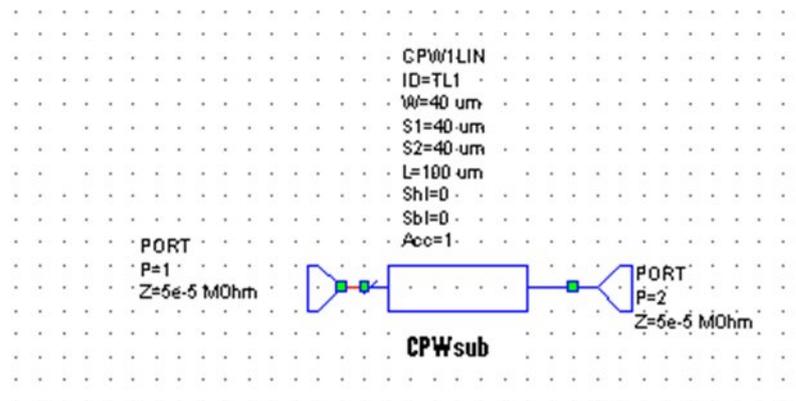


Figure III.10 : Schéma électrique pour une ligne CPW seule.

Chapitre III

Après avoir réalisé ce schéma, on obtient les graphes suivants :

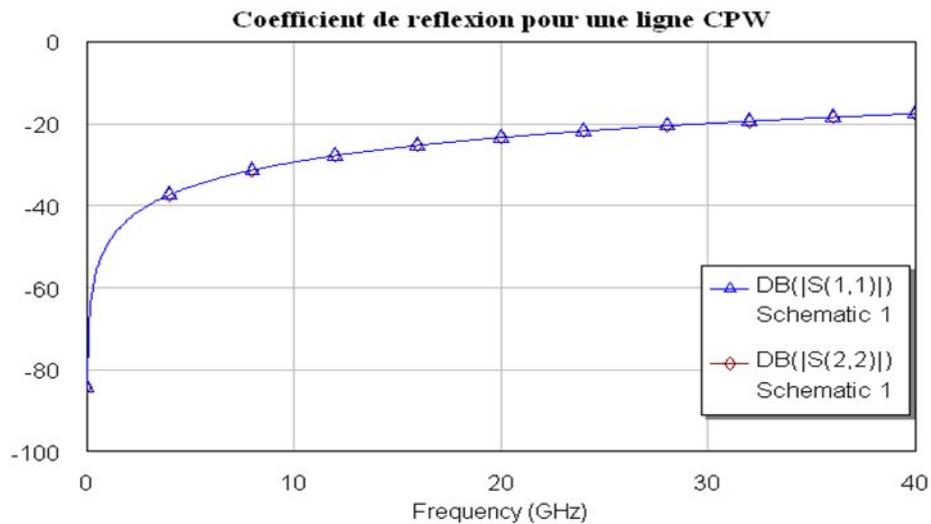


Figure III.11 : Coefficients de réflexion pour la ligne CPW.

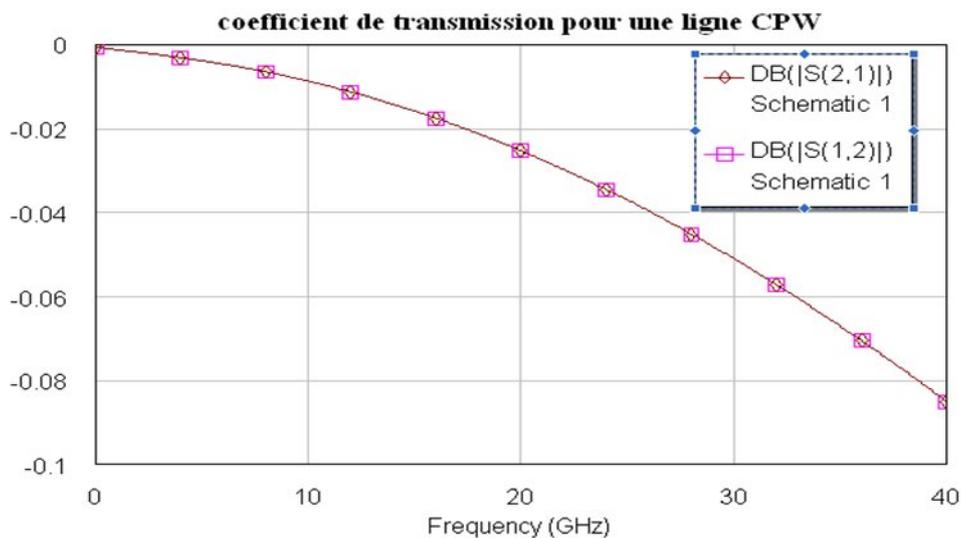


Figure III.12 : Coefficients de transmission pour une ligne CPW.

D'après les graphes résultants, on remarque que les variations en fonction de la fréquence des coefficients de réflexion (S_{11} et S_{22}) sont identiques, de même pour les coefficients de transmission (S_{21} et S_{12}). La gamme de fréquence varie de [0, 40GHz]. Ce dispositif est symétrique.

- Les coefficients de réflexion sont très faibles. On constate que lors de la propagation le long de la ligne, la totalité du signal est transmise au récepteur.

Chapitre III

En faisant varier quelques paramètres physiques de la ligne coplanaire (CPW), on remarque :

- Si on modifie la longueur de la ligne, on remarque qu'il n'y a pas d'effets sur les paramètres S. (les graphes résultant sont les mêmes que les précédents).
- Si on augmente la permittivité électrique de la ligne à partir de 15, on remarque à partir de la figure 14 que la réflexion commence à augmenter pour les fréquences supérieures à 30GHz. La figure 15 montre que le coefficient de transmission est très sensible à la permittivité du substrat de la ligne. On constate une décroissance rapide du facteur de transmission par rapport aux valeurs plus faibles de cette permittivité.

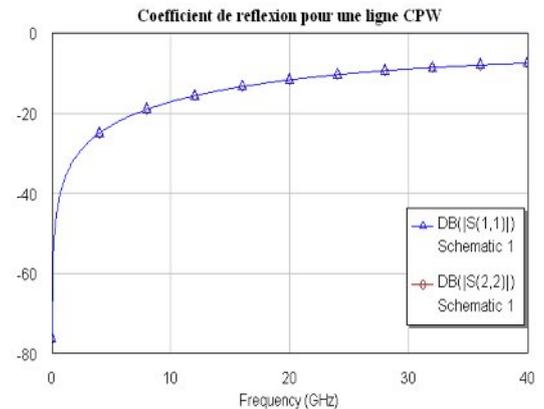
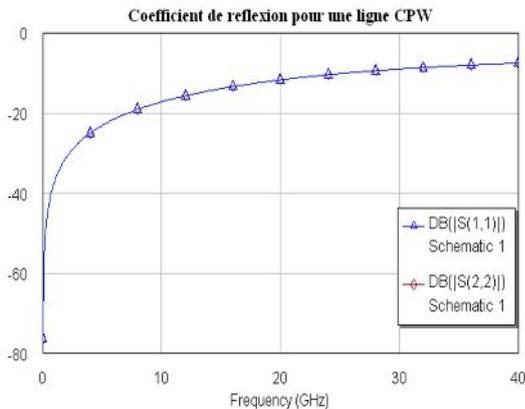


Figure III.13 : Coefficients de réflexion.

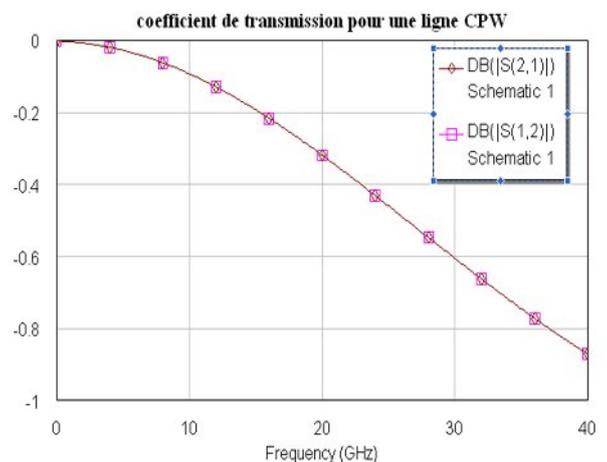
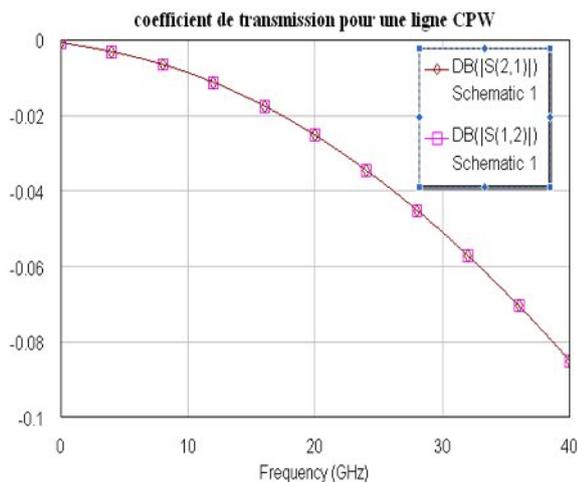


Figure III.14 : Coefficients de transmission.

L'objectif de ce travail est d'intégrer les commandes optiques (photodétecteurs) dans la ligne de transmission (CPW) utilisable pour des applications hyperfréquences.

On intègre le photodétecteur dans cette ligne (CPW), on étudie la fonction et la réponse de ce système dans le cas du photodétecteur PIN et celui du MSM.

3.1 La photodiode PIN

Le photodétecteur à diode PIN est représenté par son circuit électrique est donné dans la figure III.16 :

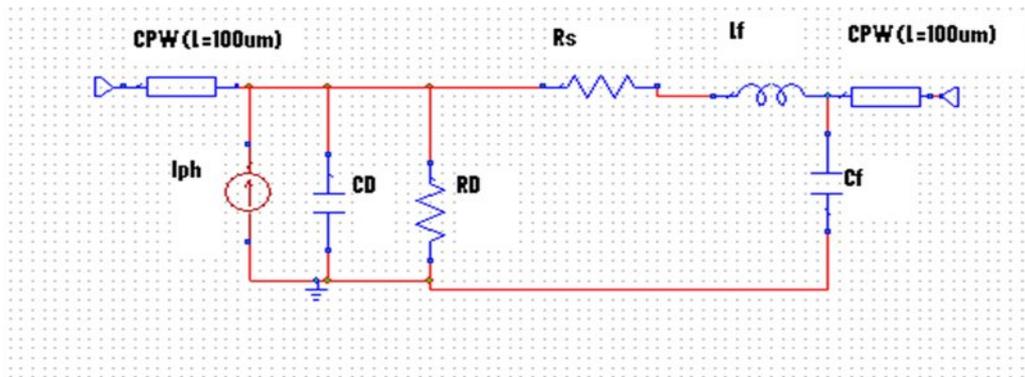


Figure III.15 : Une ligne comporte du photodétecteur PIN.

La simulation des paramètres S de ce dispositif constitué par l'ensemble d'une ligne CPW, d'un photodétecteur PIN et d'une autre ligne identique à la première a été réalisée.

Les caractéristiques du photodétecteur PIN a été données dans la partie précédente.

La courbe du coefficient de réflexion à l'entrée montre que pour des fréquences du signal supérieures à 30GHz la réflexion est importante. La puissance du signal transmis à travers ce dispositif est sensiblement réduite.

La courbe du coefficient de réflexion à la sortie montre que pour des fréquences du signal supérieures à 30GHz la réflexion est faible. La puissance du signal transmis à travers ce dispositif au récepteur n'est pas très affectée.

Pour un bon fonctionnement de ce dispositif il est nécessaire de rajouter à l'entrée du photodétecteur un dispositif d'adaptation.

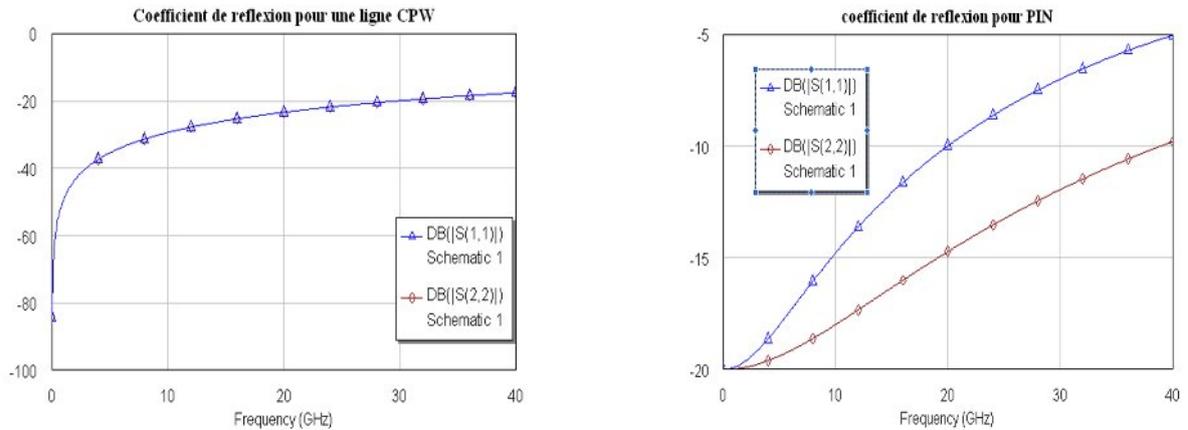


Figure III.16 : coefficients de réflexion pour PIN.

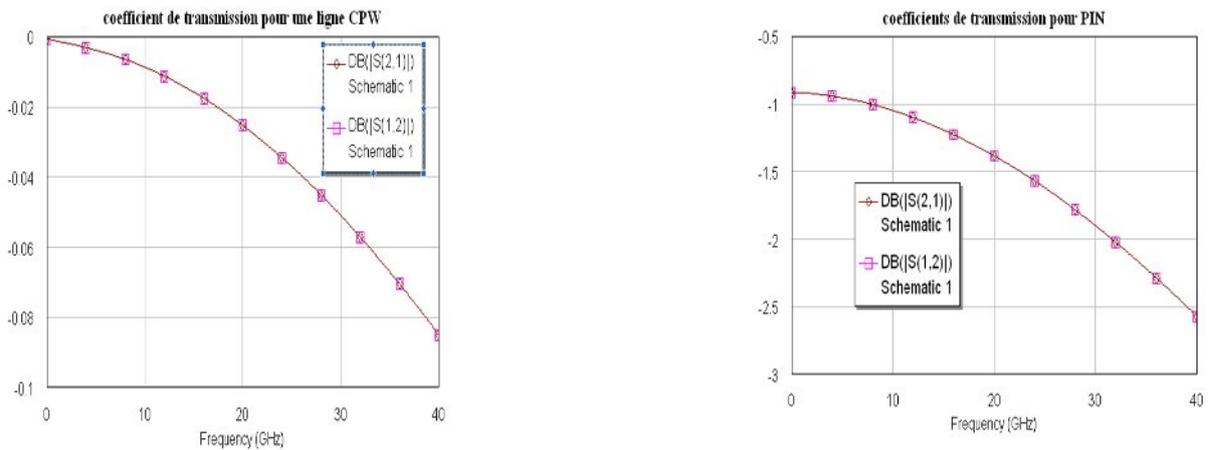


Figure III.17 : Coefficients de transmission pour la PIN.

Les courbes des coefficients de transmission montrent l'insertion du photodétecteur PIN dans la ligne affecte sensiblement ce paramètre qui est symétrique ($S_{12}=S_{21}$). On observe une atténuation importante par rapport au fonctionnement avec la ligne seule. Néanmoins cette atténuation reste faible dans toute la gamme de fréquences utilisée (jusqu'à 40 GHz où le coefficient est de $-2,5$ dB).

On constate que la photodiode PIN peut conserver l'énergie du signal dans la plage des fréquences supérieures à 40 GHz.

3.2 La photodiode MSM

On a réalisé le circuit suivant en intégrant la photodiode MSM dans une ligne CPW d'où ces caractéristiques ont été données dans le tableau III.1.

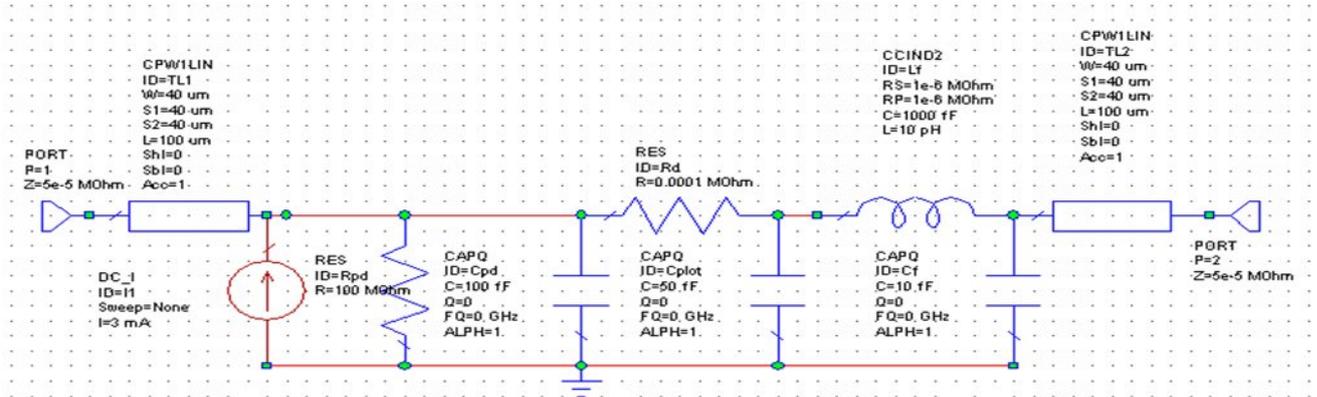


Figure III.18 : Une liaison optique en intégrant la PDMSM.

La simulation des paramètres S de ce dispositif constitué par l'ensemble d'une ligne CPW, d'un photodétecteur MSM et d'une autre ligne identique à la première qui a été réalisée.

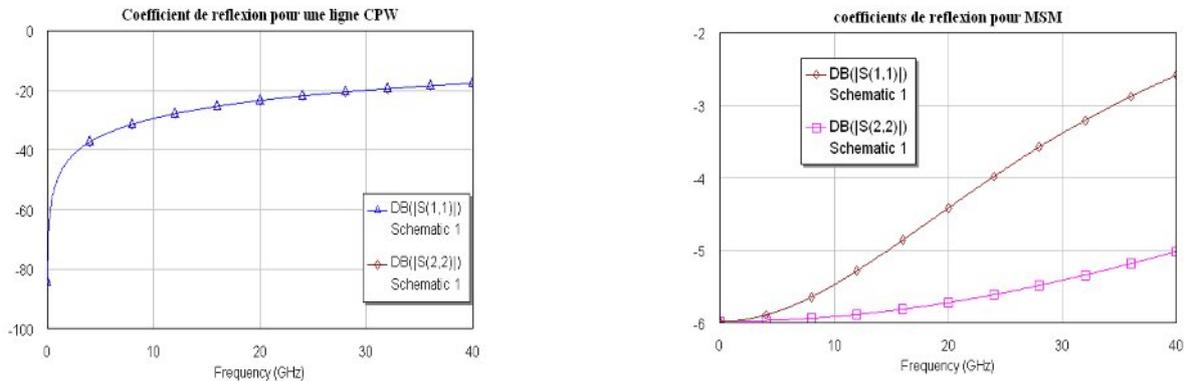


Figure III.19 : Coefficients de réflexion pour la PDMSM.

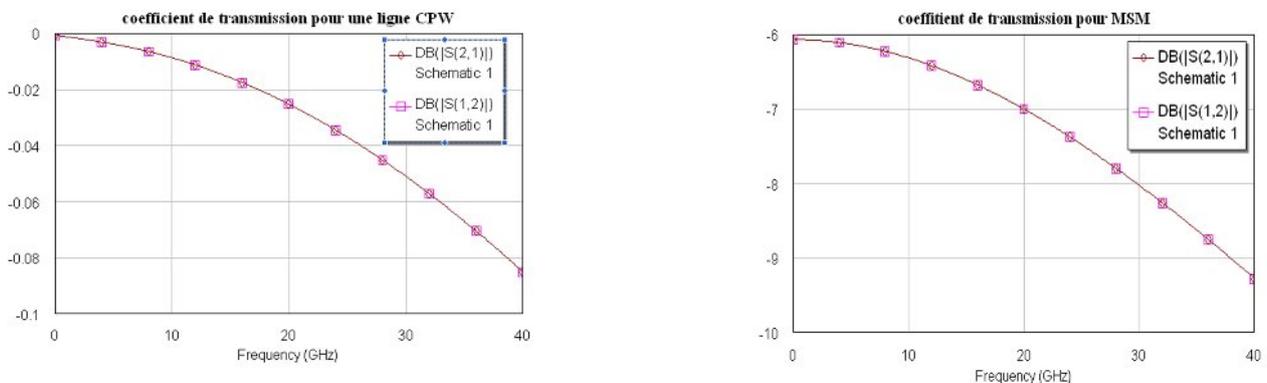


Figure III.20 : Coefficients de transmission pour la PDMSM.

Chapitre III

Les courbes du coefficient de réflexion à l'entrée montre que pour les fréquences du signal supérieures à 30GHz le coefficient de réflexion est important jusqu'il atteint la valeur -2.5 dB donc la puissance du signal transmis à travers ce dispositif est sensiblement réduite.

La courbe du coefficient de réflexion à la sortie montre que pur des fréquences du signal transmis à travers ce dispositif au récepteur n'est pas très affectée.

Pour un bon fonctionnement de ce dispositif il est recommandé de rajouter à l'entrée du photodétecteur un dispositif adaptatif.

Pour les courbes des coefficients de transmission montrent l'insertion du photodétecteur MSM dans la ligne affecte sensiblement ce paramètre qui est symétrique ($S_{12}=S_{21}$).

On observe une atténuation très importante par rapport avec la ligne seule et celle du photodétecteur PIN. Néanmoins cette atténuation est faible dans la gamme de fréquences utilisée (jusqu'à 20 GHz où le coefficient de transmission est de -7 dB)

On constate que la photodiode MSM peut conserver l'énergie du signal.

Simulation avec logiciel COMSIS

4. Présentation générale du logiciel COMSIS [11] [12]

COMSIS est un logiciel de simulation des systèmes de télécommunications en générale et optique en particulier il permet la simulation de différents systèmes.

Ses principales fonctionnalités sont :

- Analyse statistique.
- Analyse spectrale.
- Synthèse de filtres analogiques et numériques.
- Simulations linéaire et non linéaire.
- Etudes paramétriques.

Les simulations que nous mettrons en œuvre pour comparer entre la photodiode PIN et PDA.

L'objectif de cette simulation est de visualiser le signal d'entrée et de sortie en utilisant le schéma bloc d'une liaison optique présentée dans la figure (III.22) à l'aide de COMSIS.

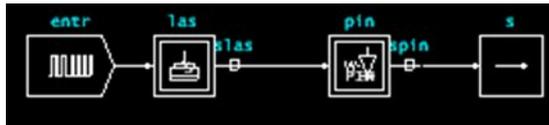


Figure III.21 : Schéma bloc d'une liaison optique.

Pour cela, on utilise deux schémas l'un pour intégrer la photodiode PIN et l'autre pour la photodiode APD dans cette liaison.

Il faut donc envoyer un signal optique, issu d'un laser et un signal électrique, représentant l'information à transmettre.

4.1. La partie émission

4.1.1. Le laser

L'entrée optique d'une liaison optique qu'on a réalisée doit recevoir un signal optique pure. On utilise donc un laser de la bibliothèque optique de COMSIS (LASER-SYSTEM) (figure III.23).

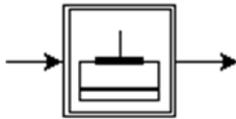


Figure III.22 : Modèle de simulation du laser

les paramètres du laser simulé sont résumés dans le tableau III.2 :

Paramètre système du laser		Données physiques du laser	
Longueur d'onde	1550 nm	Facteur de réflexion	0,25
Courant de seuil	25 mA	Rendement différentiel	0,6
Rendement	0,25 W/A	Facteur d'émission spontanée	2
Largeur de raie	5 MHz à 60 mA	Hauteur de la cavité	0,1 μm
Taux d'amortissement	2 GHz à 100 mA	Largeur de la cavité	5 μm
Bande à -3 dB	10 GHz à 100 mA	Longueur de la cavité	200 μm
Espacement entre mode	1 nm	Densité porteurs-transparence	$5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Chirp	100 MHz/mA	Facteur de confinement	0,1
Bruit RIN	-145dB/Hz à 100 mA		

Tableau III.2 : Paramètres caractéristiques du laser.

L'analyse statique de ce composant permet de visualiser la puissance optique de sortie en fonction du courant de polarisation injecté comme le montre la figure III.24.

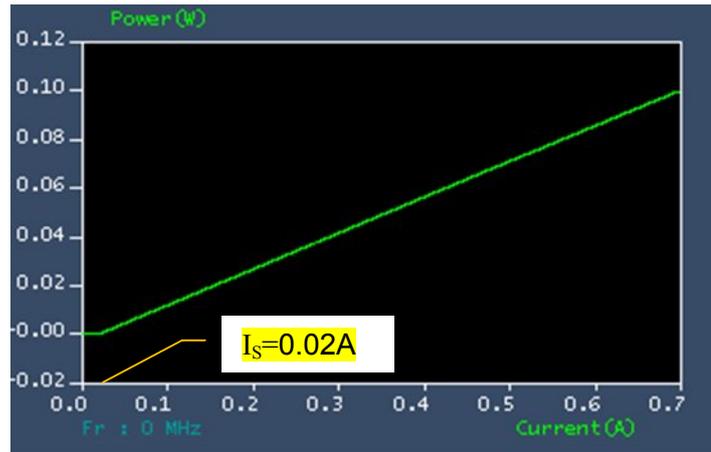


Figure III.23 : Caractéristique puissance optique en fonction du courant du laser.

La caractéristique Courant-Puissance, obtenu avec l'analyse statique du laser, permet de connaître la relation entre le courant de commande et la puissance de sortie. C'est grâce à cette courbe que le niveau de courant injecté dans le laser est fixé. Nous trouvons une valeur de 0.02A pour le courant injecté au laser.

L'entrée optique a été caractérisée, on s'intéresse maintenant à l'entrée électrique. Elle est porteuse de l'information à transmettre.

4.1.2. Les données électriques

Ce modèle permet de générer un courant d'entrée de laser, modélisé par une séquence binaire pseudo-aléatoire représentant l'information à transmettre. Le signal, formé de créneaux prend uniquement deux valeurs : I_{\min} et I_{\max} qui représentent le courant qui entre dans le laser quand l'information à transmettre est un 0 ou un 1 respectivement. Le choix de ces valeurs de courant dépend de la puissance voulue. La figure suivante présente le modèle de simulation du courant laser et le tableau III.3 résume ces paramètres de l'information.

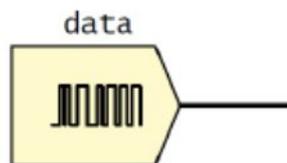


Figure III.25 : Modèle de simulation du courant laser.

Paramètres de l'information			
Débit binaire	100Mbits/s	Longueur de registre	23

Tableau III.3 : paramètres caractéristique de l'entrée représentant l'information à transmettre.

4.2. La partie réception

4.2.1. Photodiode PIN

Une photodiode PIN présente à son tour un certain nombre de paramètres et caractéristiques qui attaquent directement le signal transmis. Or le modèle existant dans la bibliothèque COMSIS ne tient compte que de quelques uns (sensibilité et courant d'obscurité).

On réalise le schéma suivant à l'aide de COMSIS :



Figure III.25 : Schéma bloc d'une liaison optique en utilisant à la réception la photodiode PIN.

Sachons que la sensibilité de la photodiode PIN est 0.9 A/W et son courant d'obscurité est de 5 nA.

Dans ce qui suit on va étudier sa puissance en sortie, on observe les courbes résultantes après l'analyse temporelle de la simulation précédente :



Figure III.26 : La puissance en fonction du temps en entrée et en sortie du laser et la photodiode PIN.

4.2.2. Photodiode APD

Dans la bibliothèque COMSIS existe la photodiode APD d'où ces caractéristiques sont les suivantes :

- Sensibilité : 0.6 (A/W).
- Courant de surface : 10 (nA).
- Courant de volume : 0.1 (nA).
- Gain : 10.
- Coefficient d'excès de bruit : 0.01.

On refaire le schéma précédent, en remplaçant la photodiode PIN avec la photodiode à avalanche (APD).



Figure III.27 : Schéma bloc d'une liaison optique en utilisant la photodiode APD à la réception.

Les courbes suivantes présentent les puissances en entrée de la liaison et en sortie du laser et de la photodiode :

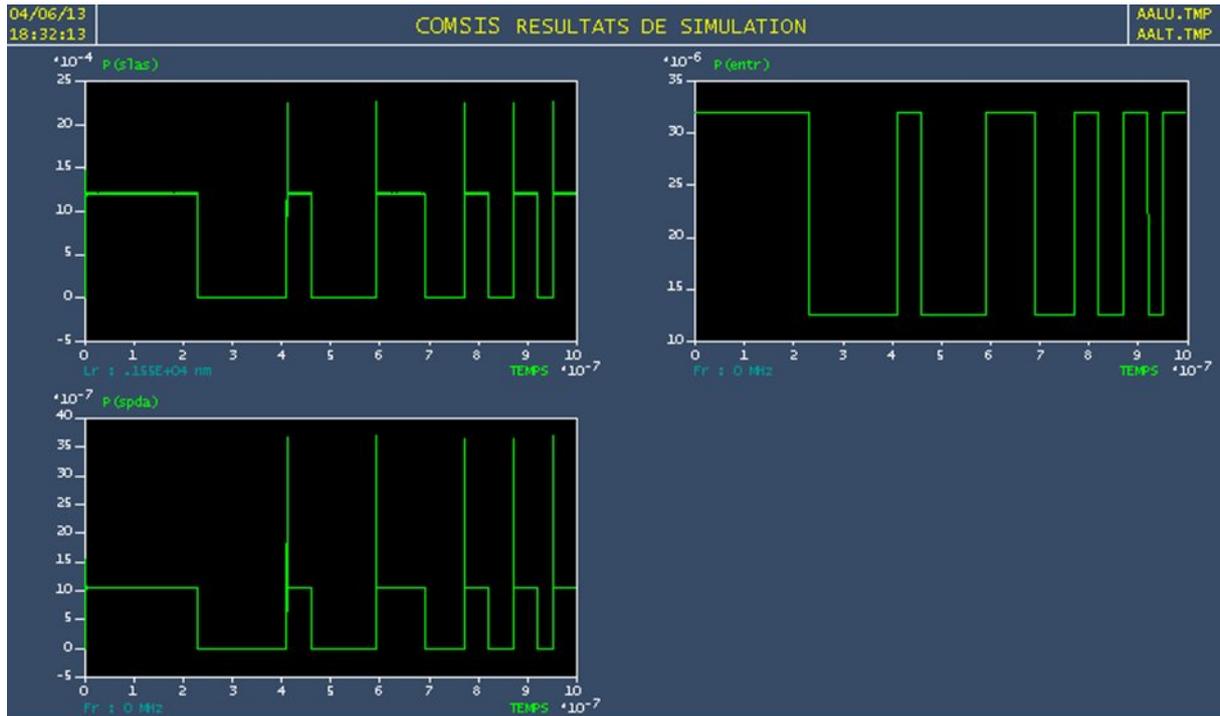


Figure III.28 : La puissance en fonction du temps en entrée et en sortie du laser et la photodiode APD.

D'après les résultats de simulation on observe le signal d'entrée a été récupéré à la sortie de la PDA et de la photodiode PIN mais avec des atténuations.

D'où l'atténuation dans le photodétecteur PDA est très importante par rapport à la photodiode PIN.

5. Conclusion

Afin d'étudier PIN, PDA et MSM dans une liaison optique, on a rappelé les caractéristiques du photodétecteur et une description détaillée sur les photodiodes PIN,PDA et MSM.

On a fait une petite présentation des logiciels utilisés (COMSIS et AWR) pour visualiser les résultats de simulation.

6. Bibliographie

- [1]- Jean- Louis Verneuil " Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbit/s " Université de LIMOGES 2003.
- [2]- Nassima Boudrioua " Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD" Thèse de doctorat Université Paul Verlaine – Metz 2007.
- [3]- Younes Zouine "Contribution par la simulation système à l'étude des contraintes des composants optoélectroniques sur la transmission optique utilisant technique CDMA" Thèse de doctorat Université de LIMOGES 2005.
- [4]- BOISROBERT Christian, TOFFANO Zeno, *Cours de DESS et DEA d'Optique et Optoélectronique*, Université de Nantes, 2001.
- [5]- C. Weber and K. Petermann "Impact of fibre nonlinearities in electronic dispersion compensation systems at 40 Gb/s" in Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC 2008), Brussels, Belgium, 2008, paper P.4.10.
- [6]- Christian Weber, Christian-Alexander Bunge, Marcus Winter, Klaus Petermann "Fibre Nonlinearities in 10 and 40 Gb/s Electronically Dispersion Precompensated WDM Transmission" IEEE: July 2009.
- [7]- A. F. Salem, A. W. Smith, and K. F. Brennan, "Theoretical study of the effect of an AlGaAs double hétérostructure on metal-semiconductor-metal photodetector performance," IEEE trans. Electron devices, vol. 41, n°. 7, pp. 1112–1119, Jul. 1994.
- [8]- M. Emmanuel MOUTAY, "Intégration de mélangeur optoélectroniques en technologie CMOS pour la télémétrie laser embarquée haute résolution", Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, spécialité : Micro-électronique et microsystème, 2010.
- [9]- W.C. KOSCIELNIAK, M.A. LITTLEJOHN, J.L. PELOURD, "Analysis of a GaAs Metal-semiconductor-Metal (MSM) photodetector with 0.1 μm finger spacing", IEEE Electron Device Letters, Vol.10, Tssu : 5, pp. 209-211, 1989.
- [10]- J. HARARI, J.P. VILCOT, D. DECOSTER, "Metal-semiconductor-Metal Photodetectors", Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, vol.12, John G. Webster, Editor, pp. 561-577, 1999.
- [11]- IPSIS, Manuel d'utilisation du logiciel COMSIS.
- [12]- RICE S.O., "Envelops of narrow-band signals", *Proc. of the IEEE*, July 1982, Vol. 70, n° 7.

CONCLUSION

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail a été d'étudier les performances des photodétecteurs PIN, APD et MSM dans une ligne de transmission.

Pour ce faire, on a commencé ce travail par les lignes de transmission et différents types de lignes à bande afin de réaliser une liaison optique en intégrant un photodétecteur. Puis on a fait une étude sur la photodétection et des photodétecteurs en essayant de comprendre les fondements de ce domaine.

Puis, on a fait un détail sur les photodétecteurs PIN, APD et MSM et de donner ces caractéristiques. Ensuite, la réalisation de la liaison optique en intégrant un photodétecteur dans une ligne coplanaire (CPW), en commençant par la photodiode PIN puis le MSM à l'aide du logiciel AWR.

A l'aide du logiciel COMSIS, on a réalisé les schémas bloc d'une liaison optique comportant un photodétecteur (PIN puis APD).

Enfin, après avoir réalisé les liaisons optiques dans le logiciel AWR. On a présenté les résultats après une analyse qui a été faite et on a visualisé les coefficients de réflexion et de transmission.

La visualisation du signal d'entrée et de sortie d'une liaison optique à l'aide du logiciel COMSIS, en remarquant que le signal a été récupéré quelque soit le photodétecteur.