



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة البحث التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي
UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR - EL OUED -

FACULTE DE LA TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

SPECIALITE : MASTER TELECOMMUNICATIONS

Thème

**Etude des performances d'une photodiode à avalanche
À base d'un hétérostructure Ge-on-Si**

Présenté par :

- Saloua Cheggouri
- Raounak Ben Moussa
- Meriem Necira

Encadré par :

- Pr. Medjouri abdelkader

Devant le jury compose de :

- Dr. Abdelkader hima
- Dr. Ridha touhami

2022/2023



Remerciements

Je dédie ce modeste travail à mon encadreur " Abdelkader Medjouri " pour la qualité de son encadrement.

Merci toute la famille et tous mes amies et collègues.

Saloua Cheggouri

Remerciements

Nous adressons nos sincères remerciements et nos vives louanges à M. Abdelkader Medjouri pour avoir accepté la direction de ce travail et pour les conseils et orientations qu'il nous a donnés et pour son aide dans la réalisation de ce mémorandum, que Dieu le récompense de tout bien.

J'adresse mes sincères remerciements à ma famille, à mes collègues, à tous ceux qui nous ont encouragés, soutenus et aidés dans notre parcours académique.

Meriem Necira

Remerciements

Je tiens à remercier le superviseur Abdelkader Medjouri de l'Université du Martyr Hama al-Akhdar pour ses efforts, ses conseils et ses conseils tout au long de la préparation du mémorandum, et j'adresse mes remerciements à ceux qui m'ont soutenu, ma famille, mes amis et mes collègues.

Raounak Ben Moussa

Abstraite

Abstraite :

Les travaux de cette thèse portent sur l'étude des performances des photodiodes à avalanche basées sur l'hétéro structure du germanium et du silicium. Ce dernier fournit des informations générales sur les communications optiques et reflète directement la sensibilité de la photo détectrice, Pour cela, nous avons divisé le travail en trois parties. Dans la première partie, nous avons étudié les communications optiques en général et de manière exhaustive sous tous leurs aspects, et dans la deuxième partie, nous avons étudié le détecteur optique en termes de caractéristiques et de critères de travail, Nous nous sommes familiarisés avec ses types, nous avons étudié plus en profondeur les performances de la photodiode à avalanche et, dans le dernier chapitre, nous l'avons consacrée à l'étude du photo détecteur appliqué en termes de conception, de dimensions et de composants. Nous avons également mis en lumière son principe de fonctionnement. Qui est divisé en simulation visuelle, simulation électrique et simulation de circuit.

Mots clés : photodétecteur, communication, avalanche.

ملخص

يتركز عمل هذه الرسالة على دراسة أداء الثنائي الضوئي للانهييار الثلجي بناء على بنية الجرمانيوم والسليسيوم الغير متجانسة يقدم هذا الأخير معلومات عامة عن الاتصالات البصرية ويعكس بشكل مباشر على حساسية الكاشف الضوئي، لهذا الغرض قد قسمنا العمل إلى ثلاثة أقسام. في الجزء الأول درسنا الاتصالات البصرية بصفة عامة وشاملة من كل النواحي. وفي الجزء الثاني درسنا الكاشف الضوئي من حيث خصائصه وإعدادات عمله وتعرفنا على أنواعه وقمنا بدراسة أكثر عمقا لأداء الثنائي الضوئي للانهييار الجليدي، وفي آخر فصل قمنا بتخصيصه لدراسة الكاشف الضوئي تطبيقيا من حيث التصميم والإبعاد والمكونات وسلطنا الضوء كذلك على مبدأ عمله الذي ينقسم إلى محاكاة بصرية ومحاكاة كهربائية ومحاكاة دائرية.

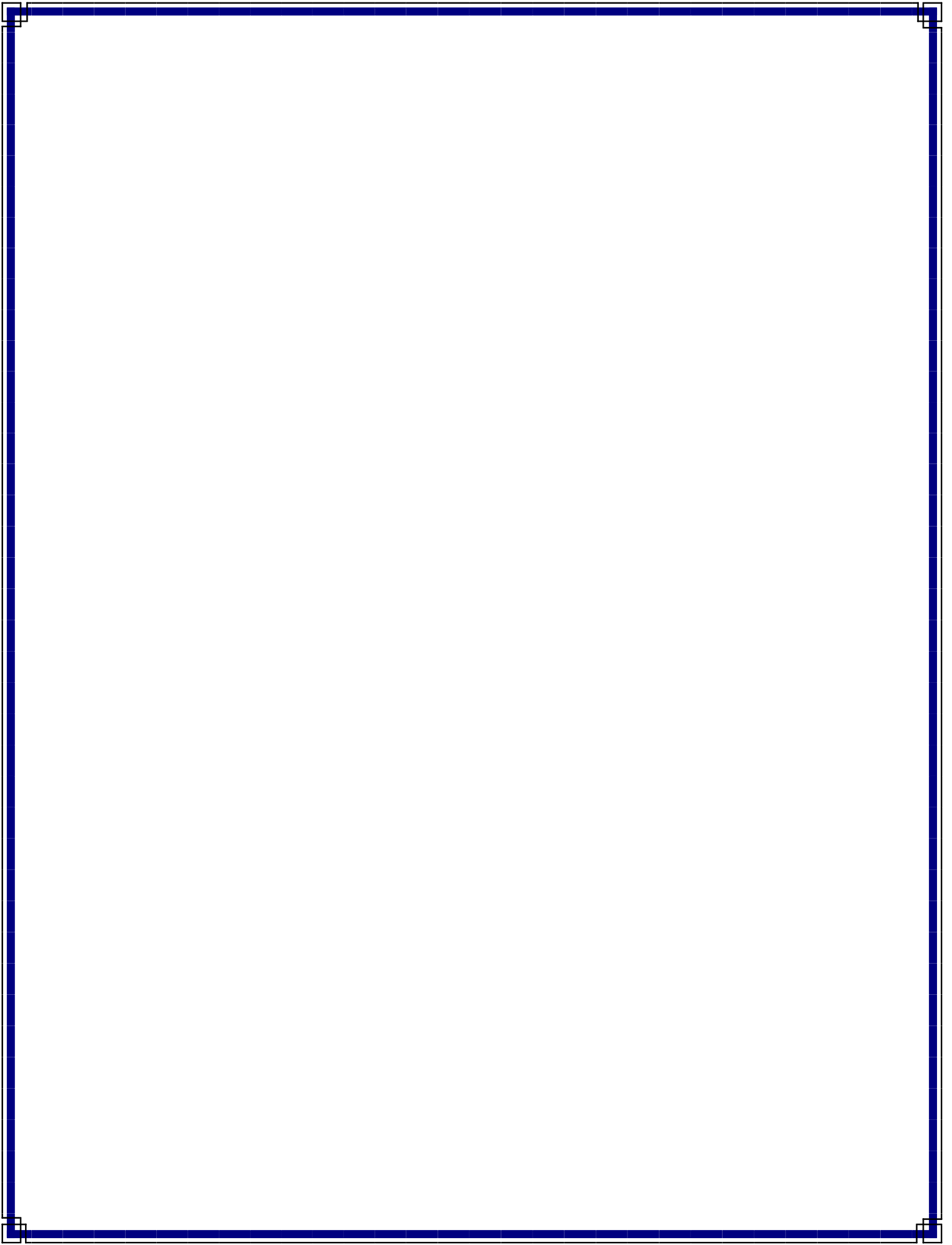
الكلمات المفتاحية : الكاشف الضوئي , الاتصالات البصرية , الإنهييار الثلجي.

Abstract:

The work of this thesis focuses on studying the performance of the avalanche photodiode based on the heterostructure of germanium and silicon, the latter provides general

information on photonic contacts and is directly reflected on the sensitivity of the photo detector, and for this purpose we have divided the work into three sections. In the first part, we studied visual communication in general and comprehensively in all respects. In the second part, we studied the photo detector in terms of its characteristics and work settings, got acquainted with its types, and made a more in-depth study of the performance of the Avalanche photodiode. In the last chapter, we have devoted it to the study of the applied photo detector in terms of design, dimensions and components. Electric al and circuit simulation.

Keywords: photodétecteur, communication, avalanche.



Sommaire

Remerciements.....	
Abstraite.....	
Sommaire.....	
Liste des figures.....	
Liste des acronymes.....	
Introduction générale.....	13
CHAPITRE I Introduction aux systèmes de Communications optiques	
I.1 Introduction.....	14
I.2 Bref historique	14
I.3 Évolution des systèmes de communications optique.....	16
I.4 Avantages des fibres optiques	19
I.4.1 Performances de transmission.....	19
I.4.2 Avantages de mise en œuvre.....	19
I.4.3 Sécurité électrique.....	19
I.4.4 Sécurité électromagnétique.....	19
I.4.5 Avantage économique.....	19
I. 5Architecture d'une liaison à fibre optique.....	20
I. 6Structure d'une fibre optique	21
I.7 Comment fonctionne la fibre optique	22
I.8 Différents types de fibres optiques.....	23
I.9 Ses différents composants.....	24
I.10 Les systèmes de transmission optique	24
I.10.1 Propagation guidée par fibre optique	25
I.10.2 La fiber optique	25
I.11 Description des systèmes de transmission optique	25
I.12 Conclusion.....	26
CHAPITRE II La photo_détecteur	
II.1 Introduction.....	28
II.2 Définition semi-conductrice	28

II.3 L'absorption des photons dans les semi-conducteurs	28
II.4 Coefficient d'absorption.....	29
II.5 Flux de photon Φ.....	29
II.6 La photo_détecteur.....	29
II.7 Type Le photo_détecteur.....	30
II.7.1 La photodiode PN classique.....	30
II.7.2 Photodiode PIN.....	31
II.7.3 La photo diode à avalanche.....	32
II.8 Principe de la photo détecteur.....	33
II.9 Parameters d'un photo detectors.....	33
II.10 Conclusion.....	34

CHAPITRE III Simulations

III.1 Introduction.....	35
III.2 Sturdee la photodiode.....	35
III.3 Composant de la photo détecteur.....	36
III.4 Simulation optique.....	37
III.5 Simulation électrique.....	39
III.6 Conclusion.....	42
Conclusion générale.....	45
Référence.....	46

LISTE DES FIGURES

FigureI.1 Tour sémaphore et code alphanumérique Chappe pour la transmission des informations entre les tours sémaphore.	15
FigureI.2 Évolution du produit débit-distance durant la période 1850-2000.	16
FigureI.3 Évolution de la capacité de transmission dans les systèmes de communications optiques. Le changement de la pente à partir de l'année 1992 est dû à l'avènement de la technologie WDM.	17
FigureI.4 Différentes générations des systèmes de communications sur fibres optiques.	17
FigureI.5 Synoptique général d'un système de communications par fibre optique.	19
FigureI.6 Section transversale et profil d'indice d'une fibre optique à saut d'indice.	21
FigureI.7 Fibre Optique monomode	23
FigureI.8 schémas d'une fibre optique à saut d'indice avec un cœur de rayon A et d'indice n_1 et une gaine d'indice n_2 .	24
FigureII.1 Illustration de l'absorption de photons dans la photodiode PN	29
FigureII.2 (A) Illustration de la structure PIN, (B) distribution de charge d'espace et (C) distribution de champ électrique intégrée.	30
FigureII.3 Le concept de multiplication de la lumière par l'effet d'avalanche en APD	31
FigureII.4 Principe d'absorption de la lumière dans le cas de semi-conducteurs intrinsèque et extrinsèque.	32
FigureIII.1 représente la section transversale de la photodiode	36
FigureIII.2 Distribution du taux de génération dans l'espace en fonction de la section de la photodiode	37
FigureIII.3 Illustrant l'exécution de deux simulations distinctes pour obtenir le flux sombre et le flux lumineux	38
FigureIII.4 l'intensité de la responsivité en fonction du voltage	38
FigureIII.5 Le gain en fonction du Bias	39

FigureIII.6 Schéma de la liaison simulée	40
FigureIII.7 Diagramme de l'œil de la liaison représentée.	42
FigureIII.8 facteurs de qualité en fonction le gain	42
FigureIII.9 BUR en fonction Gain	43

LISTE DES ARCONYMES

InGaAs	Indium Gallium Arsenide Phosphide
WDM	Wavelength-Division Multiplexing
FLAG	Fiber-optic Link Around the Globe
NFC	Near Field Communication
LED	light-emitting diode
PN	Positive et Négative.
PIN	Positive et Intrinsèque Négative.
FDTD	Différences finies dans le domaine temporel.
APD	Photodiode avalanche

Introduction générale

Introduction générale

Les technologies de l'information et de la communication sont un ensemble d'outils et de ressources technologiques pour le transfert de l'information, car le monde a connu une évolution rapide des modes d'utilisation des technologies de l'information et de la communication, d'où l'émergence de la technologie de la fibre optique et a conduit à une révolution dans l'industrie des communications, qui a permis la transmission de données sur de longues distances et à grande vitesse, La communication optique est un type de communication dans lequel la lumière est utilisée pour transmettre le signal à l'extrémité distante, elle s'appuie sur des fibres optiques pour transmettre les signaux à leurs destinations. Et de l'un de ses composants est le photo-détecteur, qui convertit le signal optique en un signal électrique selon des équations et des principes de base, dont nous parlerons plus en détail au chapitre deux. L'objectif de projet de fin de cycle est l'étude, via de simulations numériques, d'un photo-détecteur à effet avalanche à base de germanium sur Silicium. Ce manuscrit est composé de trois chapitres : dans le premier chapitre, nous donnons quelques informations générales sur les fibres optiques, leur fonctionnement, leurs caractéristiques, leurs types, leurs composants, le fonctionnement des systèmes et leur évolution dans le temps, nous discutons également de leurs applications et décrivons en détail leurs travaux.

Dans le deuxième chapitre, nous fournissons quelques informations générales sur les photo-détecteurs, et commençons par ses principaux composants, avec quelques équations qui déterminent les performances de la photo détecteur. Nous introduisons également différents types de celui-ci et nous avons fait une étude plus approfondie sur l'un de ses types à savoir celui à effet avalanche.

Dans le troisième chapitre Nous réaliserons une étude générale sur un photo-détecteur à base de Germanium sur Silicium en termes de conception, de constitution et de dimensions, et nous mènerons une étude basée sur trois phases : simulation optique, simulation électrique et simulation circuit. Nous donnerons nos observations et les conclusions à la fin.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résumera l'essentiel de ce travail.

Chapitre I

Introduction aux systèmes de Communications optiques

Chapitre I : Introduction aux systèmes de Communications optiques

I.1 Introduction

Un système de communication a pour objectif de transmettre des informations entre deux points séparés par une distance pouvant être quelques kilomètres ou même Transocéaniques. Les informations (d'origine électrique) modulent, souvent, une porteuse électromagnétique ayant une fréquence allant de quelques mégahertz ($1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$) jusqu'à des dizaines de térahertz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$). Un système de communication optique emploie des porteuses de très haute fréquence correspondante aux bandes visible et infrarouge du spectre électromagnétique. Dans le contexte de ce cours, on s'intéresse principalement aux systèmes de communication sur fibre optique.

Théoriques en 1966 par Charles kao, l'utilisation des fibres optiques dans les télécommunications est devenue possible, notamment avec l'invention des laser solides (à base de semiconducteur GaAs) fonctionnant en régime continu.

I.2 Bref historique

Dans le sens large de l'expression, les communications optiques ont été utilisées depuis l'antiquité. La plupart des civilisations humaines ont utilisé les miroirs, des balises de feu et signaux de fumée pour transmettre des courts messages (victoire dans une guerre, par exemple). C'est, pratiquement, la même idée derrière l'utilisation des lampes ou les drapeaux, vers la fin de 18ème siècle. En 1792, les frères Chappe ont proposé de transmettre des informations, codées mécaniquement, sur des longues distances (100 km environ). Le sémaphore est un moyen de communication optique. Il devait exister des relais placés les uns après les autres, chacun étant dans le champ de vision du précédent et du suivant. Un message était constitué de plusieurs symboles et traduits par des formes prises par une structure mobile. Le système ne peut être utilisé que de jour.

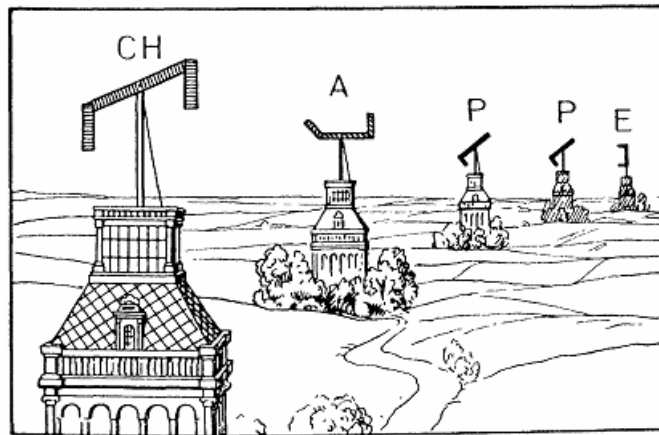


Figure I.1 Tour sémaphore et code alphanumérique Chappe pour la transmission des informations entre les tours sémaphore.

Ce système de communication opté-mécanique était lent (un débit de transmission effectif inférieur à 1Bit/s).

L'avènement de la télégraphie dans les années 1830s a donné naissance à l'ère de la Communication électrique. Le débit a été augmenté pour atteindre 10 Bit/s en utilisant le code Morse. La première liaison télégraphique câblée (transatlantique) a été mise en 1866. Le système électrique analogique a dominé le monde des communications pour environ un siècle. En plus, le remplacement des paires torsadées par des câbles coaxiaux a augmenté, considérablement, la capacité de transmission. En revanche, la bande passante du câble coaxial est limitée par les pertes pour les fréquences supérieures à 10 MHz. Cette limitation a permis le développement des systèmes de communications radio (micro-onde), dont le signal porteur est une onde électromagnétique de fréquence de 1 GHz à 10 GHz.

Chapitre I : Introduction aux systèmes de Communications optiques

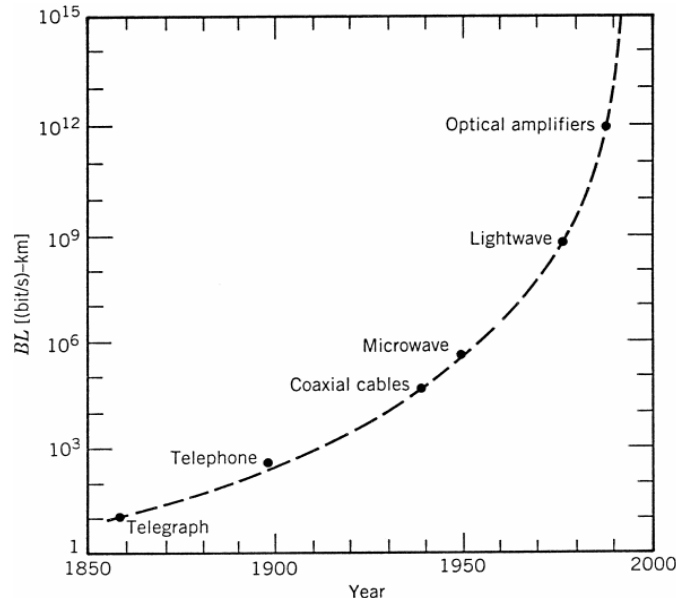


Figure I.2 Évolution du produit débit-distance durant la période 1850-2000.

Afin d'augmenter le débit de transmission de plus en plus, l'utilisation de la fréquence Optiques doivent être, éventuellement, utilisées. Cependant, deux problèmes ont été posés. Le premier est dû à l'absence d'une source optique cohérente. La solution a été, plus tard, trouvée suite à l'invention du laser en 1950. Le deuxième problème est lié au canal de transmission. L'une des solutions proposées à l'époque concerne l'utilisation des fibres optiques. Néanmoins, ces supports souffrent de très fortes pertes de propagation dépassant 1000 dB/km. En 1970, trois chercheurs de la société américaine Corning Inc. ont pu fabriquer une fibre optique avec des pertes inférieures à 20 dB/km à une longueur d'onde proche de 1 μm .

Suite aux travaux théoriques en 1966 par Charles kao, l'utilisation des fibres optiques dans les télécommunications est devenue possible, notamment avec l'invention des lasers solides (à base de semi-conducteur GaAs) fonctionnant en régime continu.

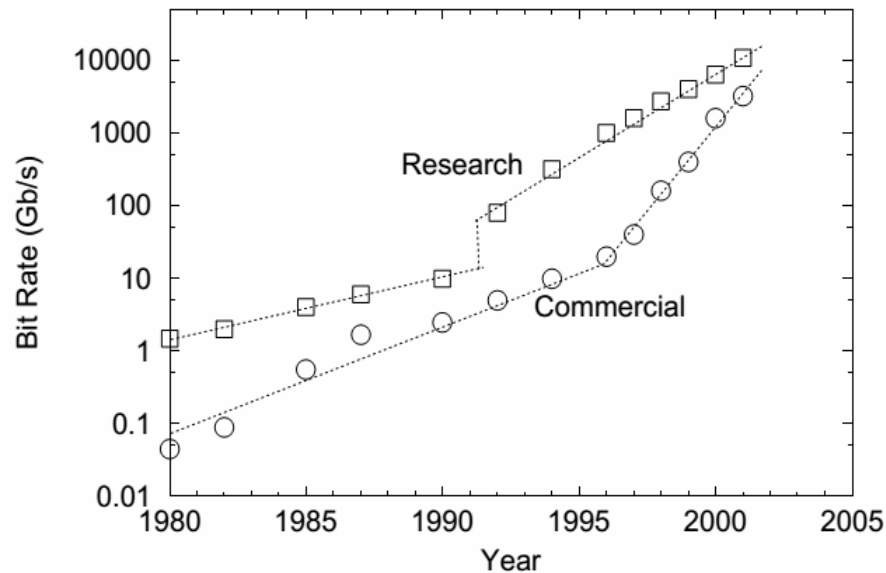


Figure I.3 Évolution de la capacité de transmission dans les systèmes de communications optiques. Le changement de la pente à partir de l'année 1992 est dû à l'avènement de la technologie WDM.

I.3 Evolution des systèmes de communications optiques

L'ère des communications sur fibres optiques a été commencée depuis l'an 1975. Pendant 25 ans du développement (jusqu'à 2000), beaucoup de développements ont vu la lumière. Ces développements peuvent être classés en quatre générations (figure ci-dessous) :

Chapitre I : Introduction aux systèmes de Communications optiques

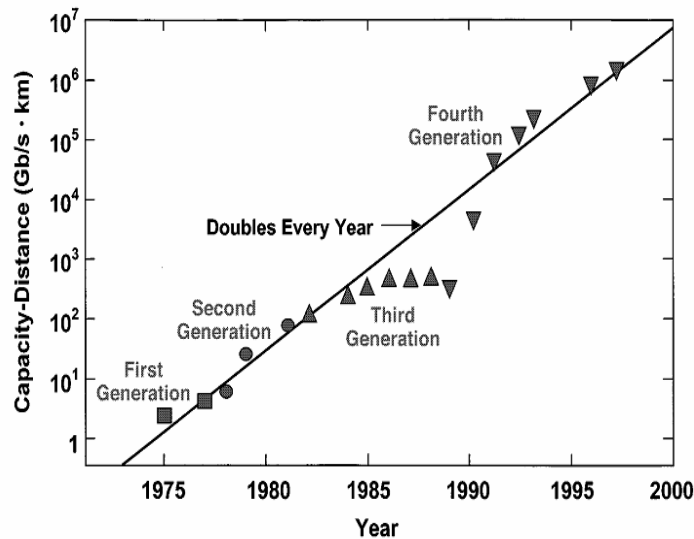


Figure I.4 Différentes générations des systèmes de communications sur fibres optiques.

- **1ère génération** (disponible commercialement en 1980) : Fonctionne autour de la longueur d'onde $0.8 \mu\text{m}$ avec un débit de 45 Mb/s et un espacement entre répéteurs de 10 km. Le laser utilisé est à base de GaAs.
- **2ème génération** (disponible commercialement en 1987) : Fonctionne autour de la longueur d'onde $1.3 \mu\text{m}$ avec un débit de 1.7 Gb/s et un espacement entre répéteurs de 50 km. Le laser utilisé est à base de InGaAs.
- **3ème génération** (disponible commercialement en 1990) : Fonctionne autour de la longueur d'onde $1.55 \mu\text{m}$ avec un débit de 10 Gb/s et un espacement entre répéteurs de 60-70 km.
- **4ème génération** (disponible depuis 1992) : Cette génération est marquée par l'introduction du multiplexage par longueur d'onde (WDM : Wavelength-Division Multiplexant) ce qui a permis de doubler la capacité de transmission chaque 6 mois et atteindre un débit de 10 Tb/s en 2001. L'introduction des amplificateurs a rendu la fibre optique un excellent candidat pour relier les différents continents de la globe (le système à 27,000 km de longueur : fiber-optic link round the globe (aussi connu sous l'acronyme de FLAG) est devenu opérationnel en 1996) (consulter le site : <http://www.submarinecablemap.com/>).

Chapitre I : Introduction aux systèmes de Communications optiques

I. 4 Avantages des fibres optiques

La fibre optique est vite apparue très intéressante pour le domaine des Télécommunications. Elle représente un support de transmission dont les nombreux avantages justifiant son introduction dans les systèmes de transmission sont donnés ci-après :

I.4.1 Performances de transmission : Très faible atténuation, très grande bande utilisable, Multiplexage possible.

I.4.2 Avantages de mise en œuvre : Très petite taille, grande souplesse, faible poids.

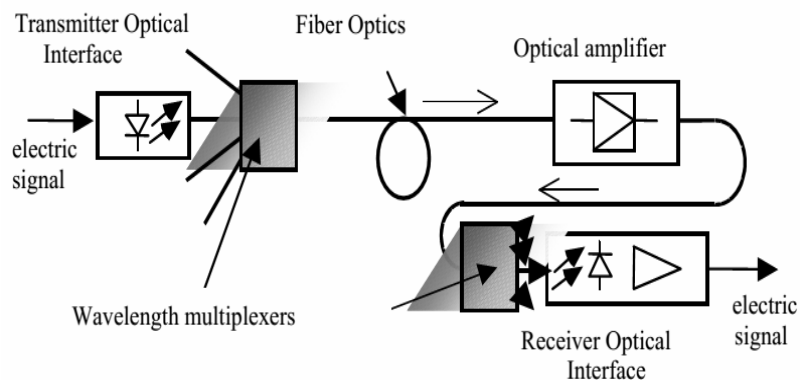
I.4.3 Sécurité électrique : Isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive ou sous fortes tensions.

I.4.4 Sécurité électromagnétique : Insensible aux parasites et n'en crée pas, inviolabilité presque totale.

I.4.5 Avantage économique : Moindre coût, en comparaison des autres supports.¹

I. 5 Architecture d'une liaison à fibre optique

L'architecture d'une liaison, quel que soit le niveau du réseau auquel elle est destinée, est composée des mêmes briques de base, à savoir un émetteur, un module de transmission et un récepteur.



FigurI.5 Synoptique général d'un système de communications par fibre optique.

Chapitre I : Introduction aux systèmes de Communications optiques

- **La fibre optique**

Une fibre optique est un fil de verre extrêmement fin, puisqu'il mesure environ un dixième d'un cheveu humain. Il a la capacité de conduire la lumière et est utilisé pour transmettre des données numériques ou pour des explorations visuelles dans le milieu médicale. L'utilisation de la fibre optique apporte de nombreux avantages comparativement à un réseau de câblage traditionnel, tels que l'atténuation des perturbations électromagnétiques, une vitesse de transfert des données beaucoup plus élevée et une bande passante bien plus large permettant de transmettre des fichiers volumineux. Le principe de fonctionnement d'une fibre optique repose sur la réfraction de la lumière. Celle-ci se propage dans le cœur de la fibre en empruntant un parcours en zigzag. Le rôle de la gaine qui entoure le cœur est de favoriser la transmission du signal grâce à un faible indice de réfraction. Elle nécessite donc une source de lumière, laser ou diode électroluminescente.

- **Émetteurs**

Un émetteur est un appareil électronique utilisé dans les télécommunications pour produire des ondes radio afin de transmettre ou d'envoyer des données à l'aide d'une antenne. L'émetteur est capable de générer un courant alternatif radiofréquence qui est ensuite appliqué à l'antenne, qui, à son tour, émet ce rayonnement sous forme d'ondes radio. Il existe de nombreux types d'émetteurs selon la norme utilisée et le type d'appareil ; par exemple, de nombreux appareils modernes dotés de capacités de communication ont des émetteurs tels que Wi-Fi, Bluetooth, NFC et cellulaire.

- **Le récepteur :**

Après propagation le long d'une série de tronçons de fibres optiques et d'amplificateurs, le signal arrive au niveau du récepteur. Le rôle de celui-ci est de récupérer la séquence binaire sous forme électrique. Le récepteur est équipé notamment d'un détecteur constitué d'une ou plusieurs photodiodes permettant la conversion du signal optique en signal électrique. Les photodiodes peuvent parfois être précédées d'un démodulateur servant à récupérer l'information binaire lorsqu'elle est stockée dans la phase du signal optique. Ceci sera détaillé

Chapitre I : Introduction aux systèmes de Communications optiques

dans le paragraphe I.D. Après détection, le signal électrique alimente une bascule de décision, qui génère un signal binaire « 1 » si le signal électrique détecté est supérieur à une certaine valeur appelée seuil de décision, et « 0 » s'il y est inférieur.

En plus du système de détection proprement dit, le récepteur doit être équipé d'un système de récupération d'horloge. Le principe de la récupération d'horloge consiste à extraire un signal d'horloge à partir du signal détecté, qui servira à créer un repère temporel nécessaire à la reconstruction du signal électrique.²

I.6 Structure d'une fibre optique

Une fibre est un guide d'onde cylindrique et diélectrique. Elle est constituée de deux diélectriques de même axe, le cœur et la gaine, entourés d'une gaine de protection (figure ci-après).

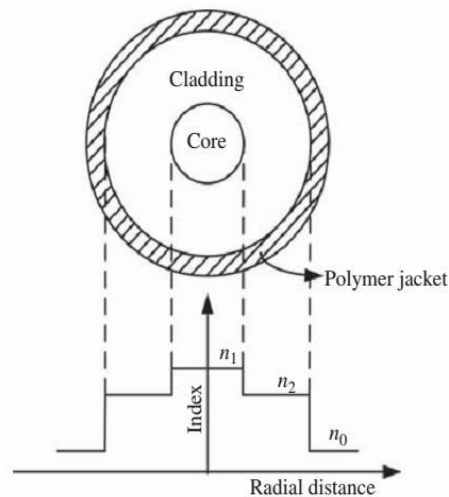


Figure I.6 Section transversale et profil d'indice d'une fibre optique à saut d'indice.

Chapitre I : Introduction aux systèmes de Communications optiques

I.7 Comment fonctionne la fibre optique

Des données transmises sous forme de signaux lumineux ou de plastique, et ce, sous forme de signaux lumineux. Ces fibres utilisables, de quelques-unes à près de 200, sont donc réunies au sein d'un même câble en fibre optique.

Très simplement, plus la lumière se propage vite, et plus l'information circule rapidement. Le câble, grâce aux fibres optiques qu'il renferme, n'a d'autre.

Ainsi, les données sont transmises par des fils, en fait Ce câble compte d'autres composants cependant. La fibre est ainsi constituée d'une âme (ou cœur), d'une gaine optique, d'un revêtement, de fibres de renforts et d'une gaine de câble, qui représente une protection.

Le choix de ces matériaux et la structure-même du câble ne doivent rien au hasard. Ils visent en effet à maximiser l'indice de réfraction. Et cela est essentiel, puisque cet indice détermine la capacité de la lumière à se propager, et donc de l'information à circuler.

Des fibres de verre fonction que de transporter un signal lumineux. Et ce signal est émis par l'intermédiaire d'une LED, c'est-à-dire une diode électroluminescente, ou d'une diode laser – plus coûteuse, mais aussi plus performante.

Pour émettre ce message lumineux, des équipements spécifiques sont installés à chaque extrémité de la fibre optique, pour transformer les signaux électriques en signaux lumineux d'abord, puis en sens inverse à la réception.

Des appareils, appelés des répéteurs, peuvent en outre être installés.

I.8 Différents types de fibres optiques

Les fibres optiques peuvent être classées en deux types selon le diamètre de leur cœur et la longueur utilisée :

- **Multimode** : dans lequel il existe différents modes de propagation de la lumière au sein du cœur de la fibre.

- **Monomode** : dans lequel il existe un seul mode de propagation de la lumière, le mode en ligne droite.

Chapitre I : Introduction aux systèmes de Communications optiques

- **Fibre multimode**

Fibre de grand diamètre du cœur (de $50\mu\text{m}$ et de $62,5\mu\text{m}$), le cœur a une taille importante par rapport au reste de la fibre. Conçue pour transporter simultanément les rayons de lumière, ces rayons lumineux peuvent des trajets différents suivants l'angle de réfraction. Les rayons peuvent donc arriver au bout de la ligne à des instants différents, d'une certaine dispersion du signal. Elles sont généralement utilisées pour de courtes distances.

Il existe deux types de fibres multimodes :

- La fibre multimode à gradients d'indice.
- La fibre multimode à saut d'indice.

- **Fibre monomode**

Est la meilleure fibre disponible aujourd'hui. C'est le type de fibre qui est utilisé au cœur des réseaux mondiaux, il n'y a qu'un seul mode de propagation de la lumière existe : le mode en ligne droite. La fibre monomode a un cœur très fin de taille ($9\mu\text{m}$) c'est pourquoi dite « monomode », l'atténuation sur cette fibre est quasi nulle. Elles sont utilisées dans les réseaux longs distants.

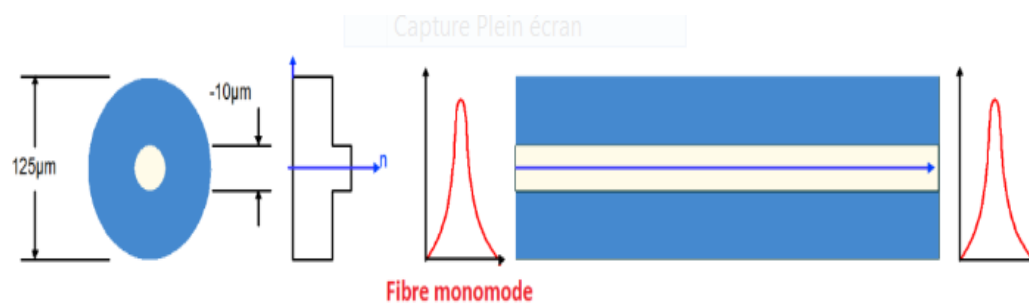


Figure I.7 Fibre Optique monomode

Chapitre I : Introduction aux systèmes de Communications optiques

I.9 Ses différents composants

Le fil de verre se voit doter diverses couches pour le maintenir et le protéger. Au cœur de la fibre se trouve le cœur ou l'âme. Elle permet de transporter le signal d'un point à un autre, entre la source de lumière et le récepteur. Il se compose de verre ou de plastique. Il en existe de différentes tailles, qui transportent plus ou moins de lumière. Son diamètre varie entre 50 et 100 micromètres. Autour de l'âme, on trouve la gaine. Elle participe à la circulation des ondes tout au long du cœur.

L'âme et la gaine optique sont contenues dans un revêtement plastique qui protège les deux premiers composants de la fibre optique. Le revêtement offre une protection contre les chocs et courbures importantes. Son épaisseur varie selon les types de fibres, entre 250 et 900 micromètres. Afin de renforcer le fil, on y trouve les fibres de renfort, pour protéger l'installation des écrasements, des tensions excessives et des rongeurs. Il existe différents types de renfort, en gel ou en fibres de Kevlar.

Ces quatre éléments sont recouverts d'une gaine finale, qui imperméabilise totalement la lumière et permet sa réfraction.

I.10 Les systèmes de transmission optique

- **I.10.1 Propagation guidée par fibre optique**
- **I.10.1.1 La fiber optique**
- Dans le domaine des télécommunications, la fibre optique peut être considérée comme un vecteur physique pouvant transporter, via un signal optique, des données numériques d'un point à un autre de la planète.
- Une fibre optique est un guide d'ondes. Son principe consiste à confiner une onde lumineuse (appartenant généralement au proche infra-rouge) à l'intérieur d'une zone, le cœur, dont l'indice de réfraction est plus élevé que celui de la zone qui l'entoure, la gaine. Les fibres optiques sont principalement constituées de silice, dopée au moyen de différents composés chimiques pour contrôler notamment le profil d'indice variant avec le rayon. La Figure I.1 montre un schéma d'une fibre optique.³

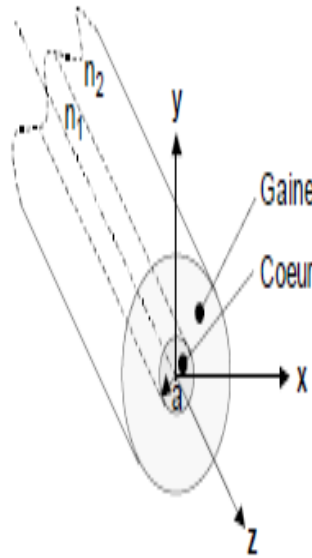


Figure I.8 Schémas d'une fibre optique à saut d'indice avec un cœur de rayon a et d'indice n_1 et une gaine d'indice n_2 .

I.11 Description des systèmes de transmission optique

Le système de transmission optique. Tous les systèmes se composent d'un bloc émetteur, d'une série de tronçons de fibres optiques séparés par des Amplificateurs, et d'un bloc récepteur. Le rôle d'un tel système est tout d'abord, au niveau de l'émetteur, d'émettre un signal optique continu et de le moduler en fonction des données binaires et du format choisi. Ensuite, il a bien sûr pour autre objectif de faire propager ce signal optique sur une distance donnée, par le biais d'une ligne optique formée de fibres optiques et d'amplificateurs, de telle sorte que le signal soit le moins affecté possible par les différents effets de propagation auxquels il est confronté. Enfin, au niveau du récepteur, ce signal optique est détecté après la transmission pour être reconverti en signal binaire électrique.⁵

Chapitre I : Introduction aux systèmes de Communications optiques

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les systèmes de communication optique, et fourni un aperçu historique de ce domaine et du développement que cette époque a connu, puis nous nous sommes également familiarisés avec les fibres optiques, la base de leur principe de fonctionnement et leurs avantages.

Nous avons également étudié la géométrie, les types et les composants de ces fibres.

Dans la deuxième partie, nous aborderons une étude théorique générale sur la photo détectrice

Chapitre II

La photodétecteur

Chapitre II : La photodétecteur

II.1 Introduction

Un photodétecteur est un composant qui absorbe l'énergie lumineuse et la convertit en énergie électrique. Dans ce chapitre, nous présentons quelques informations générales, qui incluent une définition générale de celui-ci, mentionnant ses types et ses bases, ainsi que certaines équations qui déterminent les paramètres spécifiques pour les performances du photodétecteur.

II.2 Définition semi-conductrice

Un semi-conducteur est un corps non cristallin qui n'est pas conducteur à l'état pur, mais qui est capable de conduire l'électricité après un traitement spécifique. Il est obtenu en introduisant des impuretés, n'étant négatif et p étant positif.

Les corps simples semi-conducteurs sont obtenus dans le groupe IV de la classification périodique des éléments. Ce sont le germanium, et surtout le silicium.¹

	III	IV	V	
	5 B (Bore)	6 C (Carbone)	7 N (Azote)	
	13 Al (Aluminium)	14 Si (Silicium)	15 P (Phosphore)	16 S (Soufre)
30 Zn (Zinc)	31 Ga (Gallium)	32 Ge (Germanium)	33 As (Arsenic)	34 Se (Sélénium)
48 Cd (Cadmium)	49 In (Indium)	50 Sn (Etain)	51 Sb (Antimoine)	

II.3 L'absorption des photons dans les semi-conducteurs

Comme la bande de valence d'un semiconducteur contient beaucoup d'électrons et la bande de conduction beaucoup d'états susceptibles de les accueillir, il existe une forte probabilité pour que les photons d'énergie $h\nu > E_g$ (E_g largeur de bande interdite) soient absorbés par le semiconducteur. L'électron de la bande de valence qui absorbe un photon d'énergie supérieure à E_g retourne dans les états énergétiques proches de E_c en mettant son énergie excédentaire au réseau cristallin jusqu'à ce qu'il soit en équilibre

Chapitre II : La photodétecteur

thermodynamique avec la population électronique de la bande de conduction. Les trous et les électrons générés par absorption de photons sont des porteurs excédentaires hors équilibre.²

II.4 Coefficient d'absorption

Le phénomène important qui détermine le rendement du photodétecteur et l'absorption du matériau semi-conducteur qui est caractérisée par le coefficient d'absorption α qui dépend de la longueur d'onde et de l'énergie de gap E_{gg} . Alors, si l'énergie du photon $h.c$ est supérieure au gap du semi-conducteur E_{gg} il y a donc absorption, il faut alors que la longueur d'onde λ soit inférieure à la longueur d'onde de coupure λ_c

$$dP_{abs}(Z) = P_{opt} \cdot e^{-\alpha(\lambda)Z} dz$$

II.5 Flux de photon Φ

Qui est défini par le nombre de photons atteignant la surface active par unité de temps à une longueur d'onde λ .³

$$\Phi = P_{opt} \cdot \frac{\lambda}{h \cdot C}$$

II.6 La photo_détecteur

Une photo_détecteur est constituée par une jonction PN. Entre les zones P et N apparaît sous l'application d'un champ électrique une zone de transition, appelée aussi zone de charge d'espace, qui permet la création et la séparation des paires électron-trou. Pour augmenter le rendement quantique η , la zone de transition doit posséder une épaisseur W suffisante, mais dans les photodiodes rapides la zone de transition ne doit pas être trop grande afin de diminuer le temps de transit t_r des porteurs, il existe donc un compromis entre rendement et vitesse. Les photodiodes se présentent sous forme de structures PN, PIN, métal semiconducteur et à hétérojonctions. Les photodiodes à avalanche, APD, utilisent en plus la multiplication des porteurs par effet d'avalanche afin de créer un gain.⁴

Chapitre II : La photodétecteur

II.7 Type Le photo_détecteur

II.7.1 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 photo détection. Le fonctionnement de la photodiode est illustré dans la figure. Les photons incidents, avec une énergie supérieure à celle de la bande interdite, sur la surface du composant créent des paires électron-trou dans tout le volume du matériau. La diffusion des électrons et des trous générés atteignent la ZCE 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 de la photo courant. Ils peuvent se recombiner au cours de leur déplacement La première évolution des photo détecteurs 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.⁵

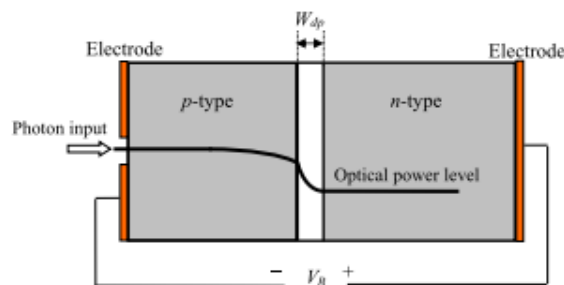


Figure II.1 Illustration de l'absorption de photons dans la photodiode PN

II.7.2 Photodiode PIN

Structure des photodiodes PIN les photodiodes PIN sont constituées par trois zones une zone dopée P suivie d'une zone intrinsèque I et d'une zone N d'où le nom du composant.

Chapitre II : La photodétecteur

Le composant est fabriqué sur un substrat, par exemple pour un composant en Incas on aura une zone P en Incas, une zone N- intrinsèque Incas et une zone N en I_{np} qui constitue le substrat. La largeur de la zone intrinsèque est optimisée afin de maximiser le rendement η_Q et aussi la réponse en fréquence à travers la bande passante Δ_F . Le rayonnement est presque entièrement absorbé dans la zone intrinsèque I. Rendement d'une photodiode PIN On peut exprimer la photo courant I engendré dans la photodiode par :

$$I = e \times h\nu [1 - \text{EXP}(-\alpha w)](1 - RF)P$$

Le terme multiplicatif devant la puissance optique P représente en fait la sensibilité de la photodiode S. W est la largeur de la zone d'absorption, α le coefficient d'absorption. RF est le facteur de réflexion Fresnel dû à l'interface air semi-conducteur donné par : de l'ordre de 30%. Dans les semi-conducteurs compte tenu des indices $NSC \approx 3$ On utilise deux configurations de photodiodes PIN rapides en Incas : a) PIN éclairée par l'avant, front illuminates, qui correspond à la configuration habituelle. Ici la lumière entre par la zone P. Cette configuration nécessite de placer le contact, blondin, en dehors de la zone active. Les pastilles de contact ont un diamètre typique entre 20 μm et 30 μm , du même ordre de grandeur que la zone active, ce qui augmente la capacité de contact. b) PIN éclairée par l'arrière, back-illuminates. Ici la lumière entre par la zone N, ceci permet de placer le contact dans la zone P entièrement en dessous de la jonction de façon à rendre la surface effective de la jonction constante, ceci facilite la fabrication et améliore les performances Photodiode à avalanche (APD) : Les APD utilisent le phénomène d'avalanche qui apparaît lorsqu'une jonction p_n est polarisée en forte inversion. Un avantage majeur des APD est qu'elles disposent de gain d'amplification de quelques dizaines à un millier, en fonction de la polarisation inverse. L'application d'un fort champ électrique à la jonction p_n permet, d'une part, d'obtenir une zone de déplétion plus.⁵

Chapitre II : La photodétecteur

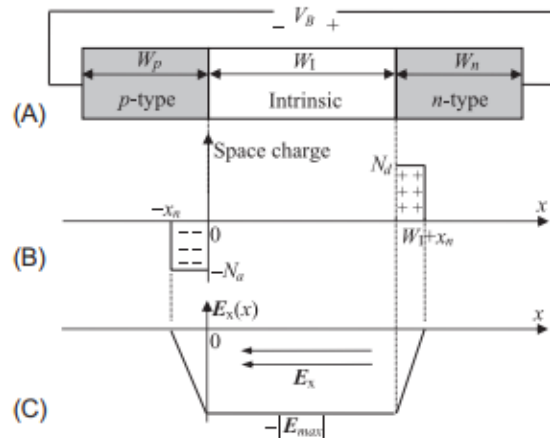


Figure II.2 (A) Illustration de la structure PIN, (B) distribution de charge d'espace et (C) distribution de champ électrique intégrée.

II.7.3 La photo diode à avalanche

Les photodiodes à avalanche (APD) multiplient en interne la photo courant du signal primaire avant qu'il n'entre dans le circuit d'entrée de l'amplificateur. Cette action de multiplication augmente la sensibilité du récepteur car la photo courante est multipliée avant rencontrer le bruit thermique associé au circuit récepteur. Comme représenté sur la Figure la multiplication des photo courants a lieu lorsque les porteurs générés par les photons traverser une région de multiplication où un champ électrique très élevé est présent. Dans cette région à champ élevé, un électron ou un trou généré par un photon peut gagner suffisamment d'énergie pour qu'il ionise les électrons liés dans la bande de valence en entrant en collision avec eux. Ce Le mécanisme de multiplication des porteurs est connu sous le nom d'ionisation par impact. Le nouvellement créé Les porteurs sont également accélérés par le champ électrique élevé, gagnant ainsi suffisamment d'énergie pour provoquer une ionisation par impact supplémentaire. Ce phénomène est l'effet d'avalanche.

$$M = \frac{i_M}{i_P}$$

Chapitre II : La photodétecteur

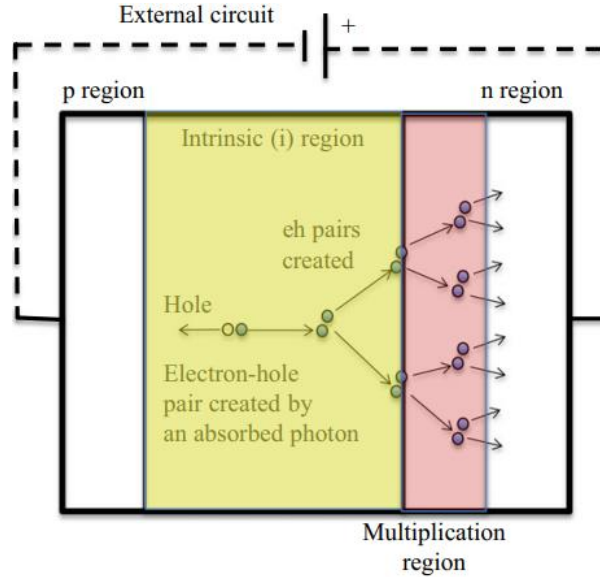


Figure II.3 Le concept de multiplication de la lumière par l'effet d'avalanche en APD⁶

Où i_M est la valeur moyenne du multiplicateur de courant de sortie total et i_p est la valeur de base Photo courant non doubler spécifier dans l'équivalent. En pratique, le mécanisme d'avalanche est un processus statistique, car toutes les paires de conducteurs créées dans une diode ne subissent pas la même multiplication. Ainsi, la valeur mesurée de M est exprimée comme quantité moyenne.

Semblable à une photodiode, les performances de l'APD se caractérisent par

Sa réponse $\mathcal{R}_{APD}$, qui est présentée par

$$\mathcal{R}_{APD} = \frac{M}{M_0} = \mathcal{R}M$$

Où $\mathcal{R}$ est la sensibilité au gain unitaire.⁷

Chapitre II : La photodétecteur

II.8 Principe de le photo détecteur

Le principe de base de la photo détection est illustré par la Figure I.1 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 de la bande de valence E_V à la bande de conduction E_C

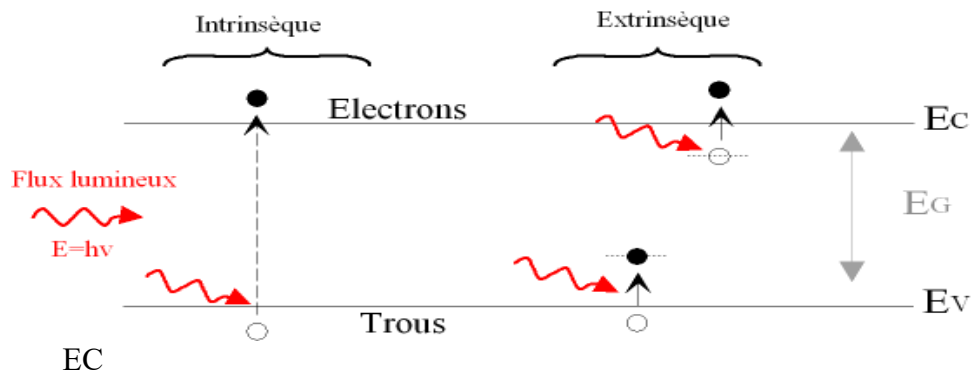


Figure II.4 Principe d'absorption de la lumière dans le cas de semi-conducteurs intrinsèques et extrinsèques.

Tout d'abord, le photon doit posséder une énergie E_{photon} égale ou supérieure 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 longueur d'onde de coupure. λ_c Au-delà de laquelle le matériau devient transparent à ce rayonnement. λ_c est déterminée par l'énergie de bande interdite E_G du semi-conducteur selon la relation suivante

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} \geq E_g \Rightarrow \lambda_c = \frac{hc}{E_g}$$

Où h : est la constante de Planck ; $h = 6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$; λ : la longueur de l'onde dans le diélectrique et c la célérité, $c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$. Le mécanisme de la photo détection est généré donc par une transition optique entre deux ensembles de niveaux quantiques.⁸

Chapitre II : La photodétecteur

II.9 Paramètres d'un photo détecteurs

Un photo detector est un composant semi-conducteur ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique. Les principaux qui définissent le fonctionnement d'une photo détecteur sont le coefficient de réponse (sensibilité), le gain, le rendement quantique, la bande passante, la puissance équivalente de bruit et la détectivité. Le coefficient de réponse R_i lie le photo courant I_{PH} à la puissance lumineuse incidente P_{opt} par la relation

$$R_i = \frac{I_{ph}}{P_{opt}}$$

Le flux de photon 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 λ d'onde donnée. Il est exprimé par la relation suivante :

$$\phi = P_{opt} \frac{\lambda}{h_c}$$

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

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

$$G = \eta \phi = \eta P_{opt} \frac{\lambda}{h_c}$$

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

$$I_{ph} = q \eta G = q \eta \frac{\lambda}{h_c}$$

$$R_i = \frac{\lambda \eta g}{h_c}$$

λ Où longueur d'onde,

h : Constante de Planck c : Vitesse de la lumière, q : Charge de⁹

Chapitre II : La photodétecteur

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni des informations générales sur les semi-conducteurs dans les domaines de la communication optique, le fonctionnement des photodétecteurs et leurs principes de base avec quelques équations qui déterminent les performances d'un photodétecteur. Nous avons également présenté différents types de détecteurs de lumière tels que PN et PIN et ce qu'est la photodiode à avalanche et comment elle fonctionne avec des applications où elle offre des performances supplémentaires meilleures que les autres diodes.

Dans la troisième partie, nous traiterons d'une étude appliquée du fonctionnement des photodétecteurs.

Chapitre III

Simulations

Chapitre III : Simulations

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré aux simulations d'une APD de type Ge sur Si. Les simulations sont réalisées dans l'ordre suivant : optique, électrique puis système.

III.2 Sturdee la photodiode

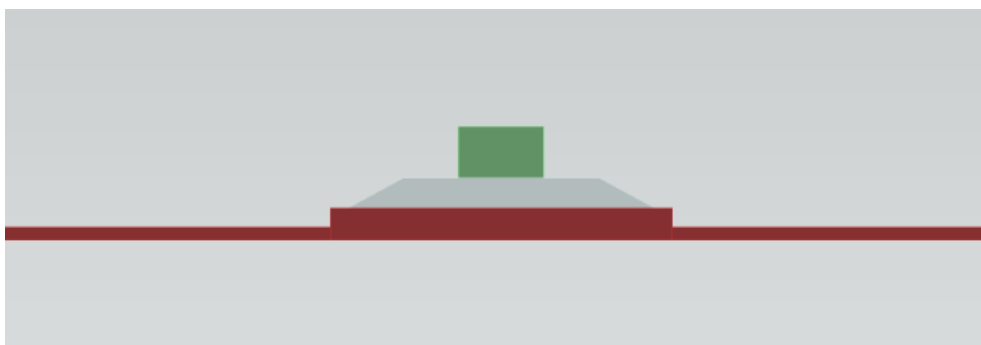


Figure III.1 représente la section transversale de la photodiode

III.3 Composant de la photo détecteur

Le tableau suivant donne les dimensions de la structure et les matériaux de la photodiode.

Nom	Boite en SiO ₂	Couche Si	Guide d'onde En Si	Guide d'onde En Ge	Contact métallique (Parfait)
X (μm)	15	15	4	2.3	1
Y (μm)	65	56.25	58	49	49
Z (μm)	8	0.15	0.37	0.35	0.6

III.4 Simulation optique

L'absorption de la lumière dans la couche Ge du détecteur est simulée dans cette étape (en supposant qu'une lumière TE monomode arrive dans le guide d'ondes pour la détection) et est convertie en un profil de taux de génération qui est nécessaire pour la simulation électrique à l'étape suivante. Ce taux de génération

Chapitre III : Simulations

est moyenné sur la longueur du dispositif afin de simplifier la simulation électrique en réalisant la simulation au niveau de la section du dispositif dans un plan 2D.

On utilise la méthode FDTD (différences finies dans le domaine temporel) pour résoudre les équations de Maxwell et déterminer le taux de génération dans la photodiode.

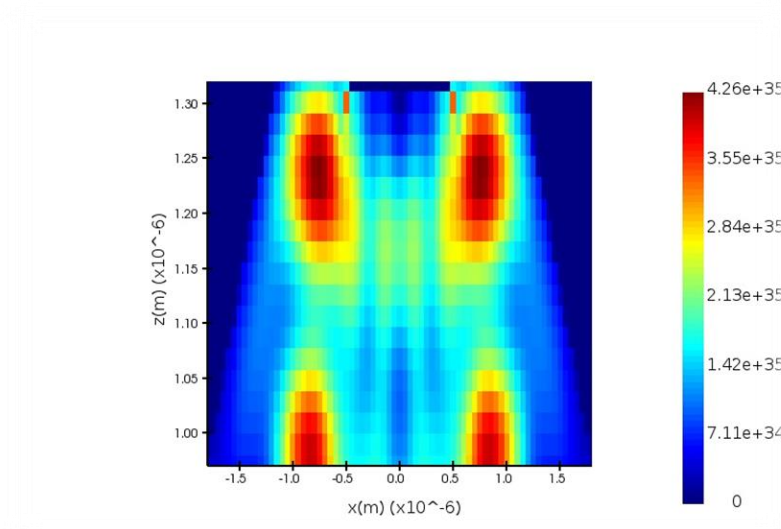


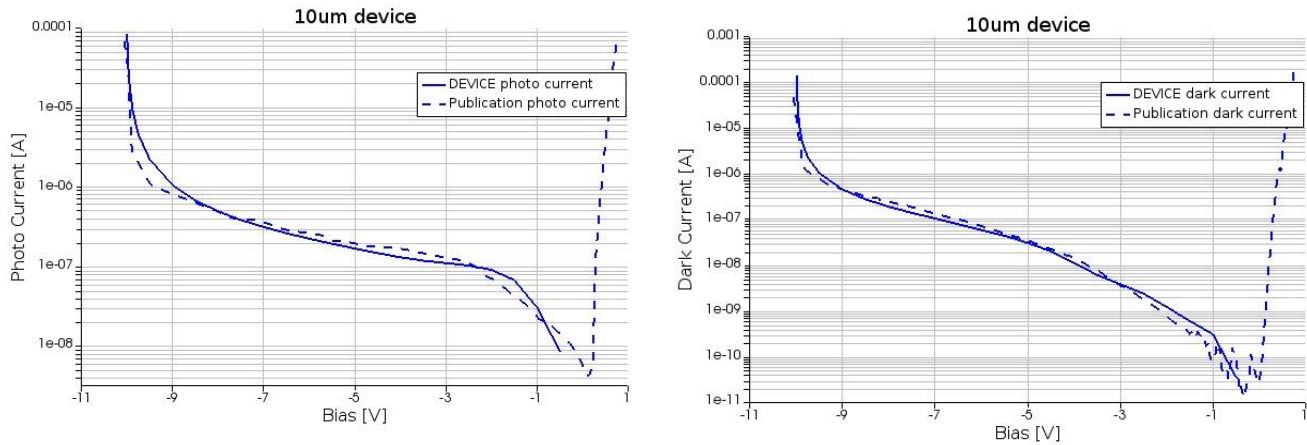
Figure III.2 Distribution du taux de génération dans l'espace en fonction de la section de la photodiode.

III.5 Simulation électrique

Les données de taux de génération optique (représentant la concentration de porteurs photogénérés l'intérieur du dispositif) sont importées dans la simulation électrique. Ensuite deux simulations distinctes sont effectuées pour obtenir le courant d'obscurité et la photo courant en désactivant et en

Chapitre III : Simulations

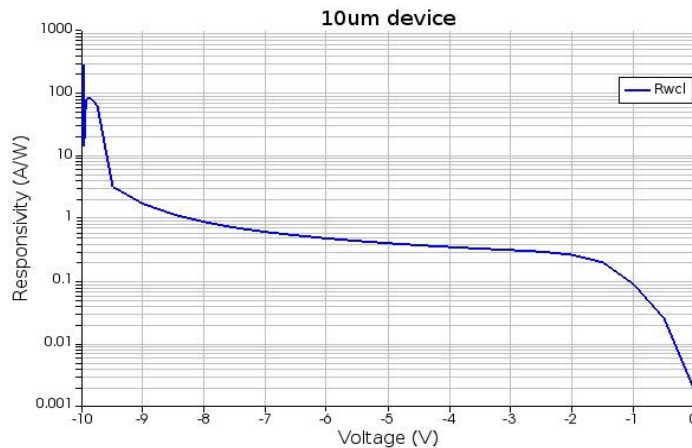
activant l'objet de génération optique, respectivement. La sensibilité le gain de multiplication du détecteur peut être calculés à partir du résultat du photo courant.



FigureIII.3 Illustrant l'exécution de deux simulations distinctes pour obtenir le flux sombre et le flu:

On remarque qu'est résultat obtenu est sont en adéquation avec est résultat article scientifique

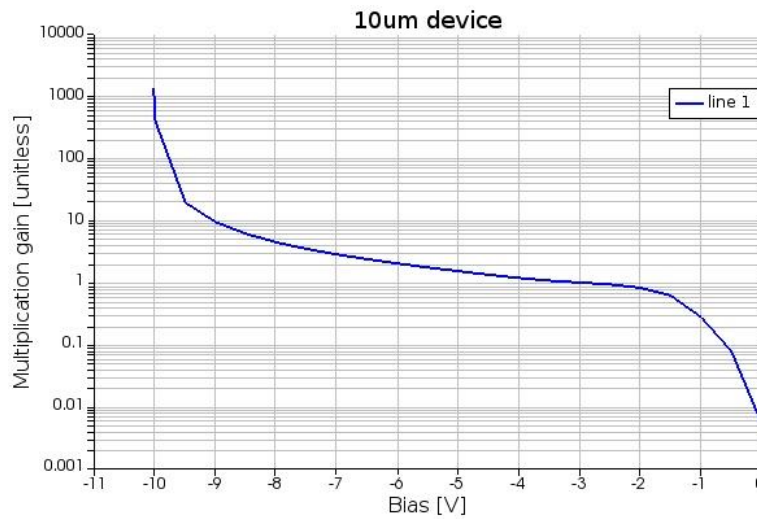
On remarque L'augmentation de la valeur de la polarisation inverse est directement proportionnelle à la valeur de courante et photo courante



FigureIII.4 l'intensité de la responsivité on fonction voltage

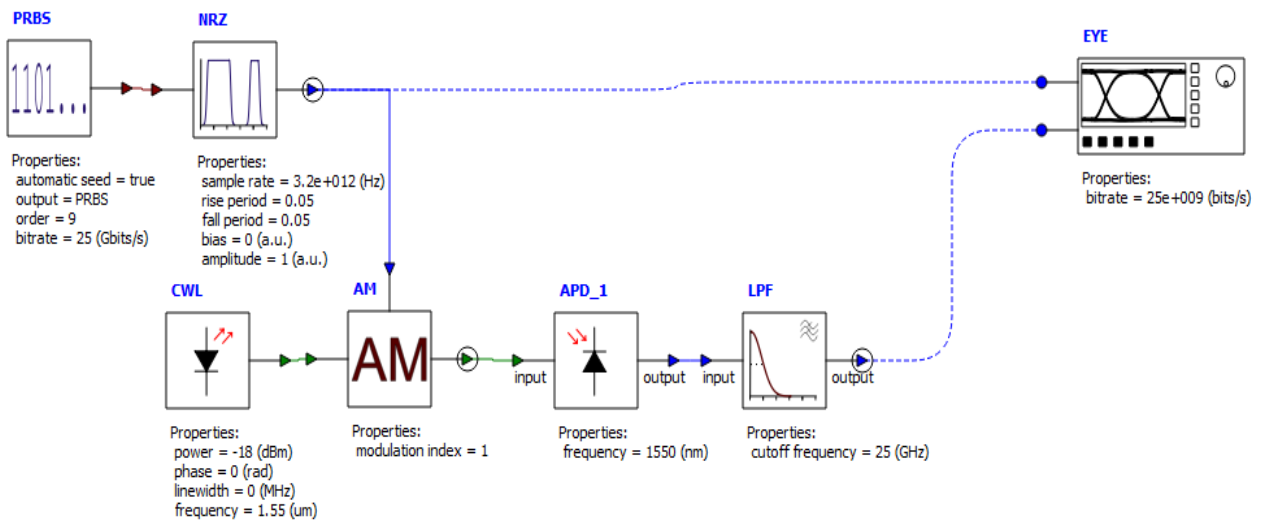
Chapitre III : Simulations

On remarque la valeur de la tension inverse est directement proportionnel la valeur de responsivité.



FigureIII.5 Le gain en fonction le Bias

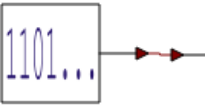
III.6 Simulation circuit



FigureIII.6 Schéma de la liaison simulée

Chapitre III : Simulations

PRBS



Properties:
automatic seed = true
output = PRBS
order = 9
bitrate = 25 (Gbits/s)

PRBS : Une séquence binaire pseudo-aléatoire (Enture) il s'agit d'un bloc qui génère une séquence binaire de bit semi aléatoires

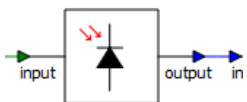
AM



Properties:
modulation index = 1

AM Amplitude modulation.

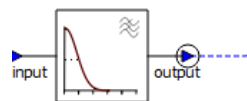
APD_1



Properties:
frequency = 1550 (nm)

Photo diode avalanche

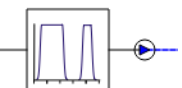
LPF



Properties:
cutoff frequency = 25 (GHz)

LPF C'est un filtre qui laisse passer les signaux basse fréquence et dégrade (réduit l'intensité) des signaux dont les fréquences sont supérieures à la fréquence de coupure.

NRZ



Properties:
sample rate = 3.2e+01
rise period = 0.05
fall period = 0.05
bias = 0 (a.u.)
amplitude = 1 (a.u.)

NRZ Le non-retour à zéro.

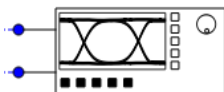
CWL



Properties:
power = -18 (dBm)
phase = 0 (rad)
linewidth = 0 (MHz)
frequency = 1.55 (um)

CWL Continue Waves Laser (Laser à onde continue)

EYE



Properties:
bitrate = 25e+009 (bits/s)

Un diagramme de l'œil est utilisé pour évaluer la qualité du signal détecté et sa variation en fonction du gain du détecteur (facteur de multiplication).

Chapitre III : Simulations

On s'intéresse à analyser les performances du système en étudiant le diagramme d'œil du signal de sortie pour différentes valeurs du gain de photo détecteur.

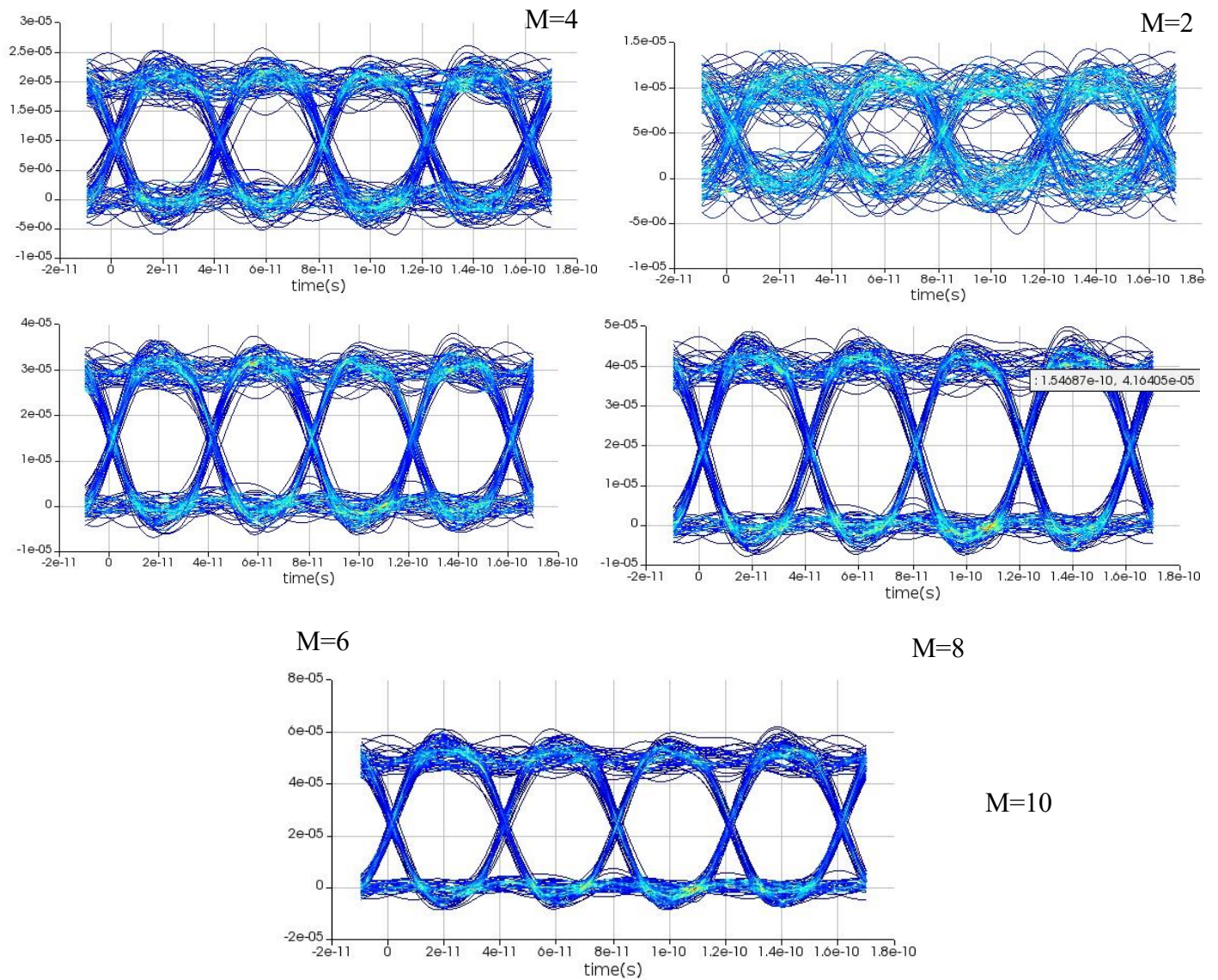


Figure III.7 Diagramme de l'œil de la liaison représentée.

Chapitre III : Simulations

On remarque que l'ouverture de l'œil augmente en augmentant le gain. Cal est bénéfique pour assurer une transmission avec la moindre d'erreur.

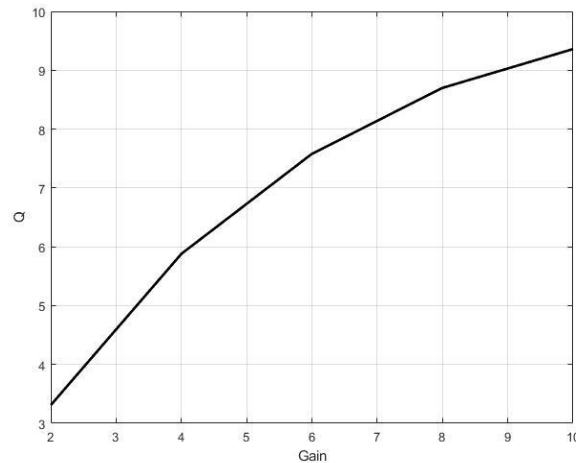


Figure III.8 facteurs de qualité en fonction le gain

On remarque L'augmentation de la valeur des facteurs de qualité est directement proportionnelle à la valeur le gain. Comme nous le notons dans la valeur Gain =4 correspond en valeur facteurs de qualité=6 et à la valeur Gain =9 correspond en valeur facteurs de qualité=9.

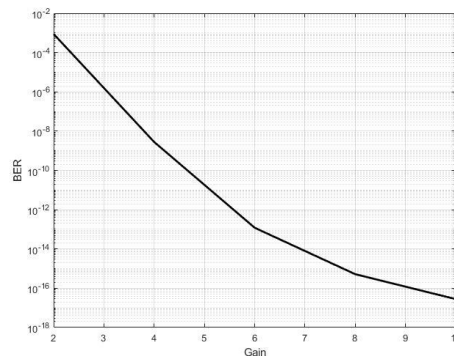


Figure III.9 BUR en fonction Gain

On remarque La diminution de la valeur BER est inversement proportionnelle à la valeur le gain.

Chapitre III : Simulations

Comme nous le notons dans la valeur Gain =3 correspond en valeur BUR= 10^{-6} Et à la valeur Gain =7 correspond en valeur BUR = 10^{-14} .¹⁵

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la photo détectrice en termes de conception, de composants et de dimensions, puis avons divisé le processus en trois étapes : simulation optique et simulation électrique et simulation circuit.

Dans simulation optique Nous avons appliqué une étude appliquée qui montre l'emplacement des photons dans différentes couleurs, où nous avons constaté que la couleur orange indique l'emplacement des photons.

Dans simulation électrique Nous avons appliqué une étude appliquée montrant les valeurs du courant électrique résultant de l'absorption des photons et les valeurs du courant électrique produit sans l'absorption des photons, et nous avons constaté qu'elles sont directement proportionnelles à l'augmentation polarisation de l'inverse, Nous avons également examiné les valeurs responsivité résultantes et avons remarqué qu'elles leur sont directement proportionnelles voltage

Dans simulation circuit Nous avons réalisé une étude appliquée qui montre la qualité de l'image résultant d'un signal transmis, et nous avons remarqué que la qualité de l'image est liée aux valeurs d'amplification, où plus l'amplification est grande, plus l'image est claire, Nous avons également étudié le facteur de qualité et constaté qu'il est directement proportionnel aux valeurs les gain, Nous avons également remarqué que les valeurs de bruit sont inversement proportionnelles aux valeurs de le gain .

Conclusion générale

Conclusion générale

Et à la fin de notre étude scientifique, dans laquelle nous avons discuté de l'étude de modélisation approfondie d'un type spécifique de la dernière technologie de photodiode à avalanche (APD) InGaAs / PIN utilisée dans les systèmes de communication à fibre optique multi-gigabit actuels et futurs. Nous avons donné une brève introduction aux communications par fibre optique en gardant à l'esprit la structure globale du système, les principaux avantages par rapport aux autres technologies et les développements historiques de la technologie.

Où nous avons examiné les performances de l'appareil en développant un modèle analytique pour le courant d'obscurité, l'efficacité quantitative, la réponse et la détection, et les résultats obtenus à partir du modèle analytique ont été comparés et comparés à ceux obtenus à partir du programme de simulation Ansys, où nous avons remarqué qu'il y a un assez bon accord entre les résultats obtenus par l'analyse.

Référence

Référence

- [1] SLIMI Quinette, microlentille d'une fibre optique, diplôme de MAGISTER SETIF UFAS (ALGERIE), 2011, Pag (3).
- [2] Mathieu LEFRANÇOIS, Étude de technologie avancée pour multiplexés en longueur d'onde au débit de 40 GBIT/S, Diplôme de doctorat de l'université, PARIS-SUD, 2007, Pag (35).
- [3] Mathieu LEFRANÇOIS, Étude de technologie avancée pour multiplexés en longueur d'onde au débit de 40 GBIT/S, Diplôme de doctorat de l'université, PARIS-SUD, 2007, Pag (28)
- [4] Mathieu LEFRANÇOIS, Étude de technologie avancée pour multiplexés en longueur d'onde au débit de 40 GBIT/S, Diplôme de doctorat de l'université, PARIS-SUD, 2007, Pag (25)
- [5] Ghana HARZALLAH, Etude et modélisation d'un photo detector MSM à base de ZnO, memoir master, université mentouri, Constantine faculte des sciences de l'ingenious
- [6] Ghania HARZALLAH, Etude et modélisation d'un photo détecteur MSM à base de ZnO, mémoire master, université mentouri, Constantine faculte des sciences de l'ingénieur
- [7] Ghania HARZALLAH, et modélisation d'un photo détecteur MSM à base de ZnO, mémoire master, université mentouri, Constantine faculte des sciences de l'ingenieur
- [8] Guemaz chaouki, Benamara karim, Saida Aboubaker et Guitoubi chaima, mémoire master, université el oued, Etude et Simulation d'une Photodiode a bas de Gan, ,2021.2022
- [9] Guemaz chaouki, Benamara karim, Saida Aboubaker et Guitoubi chaima, mémoire master, université el oued, Etude et Simulation d'une Photodiode a bas de Gan, 2021.2022
- [10] PALAIS, Joseph C. Fibre optique communications. *Englewood Cliff*, 1984.
- [11] Guemaz chaouki, Benamara karim, Saida Aboubaker et Guitoubi chaima, mémoire master, université el oued, Etude et Simulation d'une Photodiode a bas de Gan, 2021.2022

Référence

[12] HUI, Ranging. *Introduction to fiber-optic communications*. Academic Press, 2019.

Pag (137)

[13] Ranging. *Introduction to fiber-optic communications*. Academic Press, 2019. Pag

(138)

[14] Abdelhafid CHAABI, Mohamed REMRAM, Chérifa AZIZI, Touraya BOUCHEMAT, Ramdane MEHAMD, UNIVERSITE MENTOURI. CONSTANTINE FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR, Etude et modélisation d'un photo détecteur MSM à base de ZnO, Pag (13)

[15] HUANG, Zhihong, et al. 25 Gbps low-voltage waveguide Si-Ge avalanche photodiode. *Optica*, 2016, 3.8: 793-798.