

UNIVERSITE DE LILLE 1
U.F.R. I.E.E.A.

N° : 2884

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE LILLE 1

Discipline : Electronique
présentée et soutenue publiquement par

Pascal PECCI

le Jeudi 14 décembre 2000

Titre :

***Conception, fabrication et analyse d'une source
intégrée laser-modulateur électro-absorbant à
ondes progressives pour des transmissions
optiques haut débit à 1.55 μm sur InP***

M. Jean-René BURIE
M. Paul CROZAT (IEF)
M. Didier DECOESTER (IEMN)
M. Didier HERVE (ENST Brest)
M. Patrick KENNIS (IEMN)
M. Henri PORTE (Université de Besançon)
M. Raymond QUERE (Université de Limoges)

Responsable Alcatel
Examineur
Président
Examineur
Directeur de thèse
Rapporteur
Rapporteur

L'ère d'une société de communication basée sur les nouvelles technologies est en marche : Internet, révolution numérique... Pour répondre à ce besoin de transmettre toujours plus d'informations, la solution actuellement est d'avoir recours aux transmissions sur fibre optique qui sont capables de véhiculer de hauts débits. En amont de la fibre se situent différents composants photoniques, dont un permettant de coder le signal : le modulateur.

Cette thèse étudie une nouvelle source sur InP constituée d'un laser émettant à $1.55 \mu\text{m}$ intégrée à un modulateur à ondes progressives. Sa particularité est d'avoir, théoriquement, des bandes-passantes supérieures à 40 GHz, d'où le nom de haut débit, ainsi que des tensions de commande inférieures à $2 V_{pp}$.

Dans un premier temps, un historique des télécommunications permet de situer la thèse dans son contexte. Puis, nous nous focalisons sur la conception du composant. Une première version est conçue numériquement afin de connaître les paramètres électriques de base du composant (indice de propagation n_e , atténuation α_e , impédance caractéristique Z_c) et leur influence sur le fonctionnement. Après analyse, une seconde version est réalisée, permettant d'augmenter Z_c ce qui diminue la tension de commande et limite les pertes.

Le chapitre 3 s'intéresse à la fabrication des composants qui sont ensuite mesurés et analysés (chapitre 4). Nous découvrons ainsi les clés du monolithe (importance de Z_c et α_e , faible influence de n_e) et comment les maîtriser.

En conclusion, les idées sur l'ILMTW ne sont plus préconçues mais concrètes : la source intégrée possède une puissance de sortie optique de 1 mW (0 dBm) avec une monomodalité aussi bien transverse que longitudinale et un taux d'extinction de 20 dB pour $2 V_{pp}$. Ses performances actuelles en termes de bande-passante et gain en tension sont comparables à celles des sources à électrode discrète, mais une légère modification permettrait un gain en performance de 30 %.

DESIGN, REALIZATION AND ANALYSIS OF AN INTEGRATED LASER TRAVELING WAVE ELECTRO-ABSORPTION MODULATOR (ILMTW) FOR $1.55 \mu\text{m}$ HIGH BIT RATE OPTICAL TRANSMISSION ON INP

The era of a communication society based on new technologies keeps going on : Internet, numerical revolution... An answer to this ceaseless need of transmitting data is to use optical fibre transmissions which are able to carry high bit rates. Upstream of the fibre stand different photonics components, one of which allowing to code the signal : the modulator.

This Ph.D. studies a new InP-source based on an integrated $1.55 \mu\text{m}$ laser traveling wave modulator. Its features are theoretically to have bandwidths higher than 40 GHz, and also driving voltage lower than $2 V_{pp}$.

Firstly, an history of the telecommunication puts the Ph.D. back in its context. Then we focus on the component's designing. The first version is computer-aided design in order to know the electrical-based parameters (propagation index, dimming, characteristic impedance) and their influence on the running. After analysis, a second version is designed allowing us to increase the impedance Z_c to reduce the driving voltage and also to limit losses.

Chapter 3 deals with the components making which are then measured and analysed (chapter 4). We then unveil the key-points of the modulator by physically explaining its running.

Finally the integrated source has a 0 dBm optical power with a longitudinal and transverse monomodality and also a 20 dB extinction ratio for $2 V_{pp}$. Its performances considering the bandwidth-voltage efficiency product are comparable to a classic lumped-electrode modulator (LM). Nevertheless simulations show that we could easily increase the merit factor of 30 % compared to LM.

Discipline : Electronique

Mots-clés : télécommunications, source, haut-débit, InP, modulateur,
électro-absorbant, ondes progressives

Laboratoire : Alcatel C.I.T., OPTO+, Route de Nozay, 91460 Marcoussis

Table des matières

Remerciements

Table des matières

Introduction

Chapitre 1 : Le monde des télécommunications, contexte et enjeux de la thèse

I. Le monde des télécommunications

- I.1. Historique
 - I.1.a. Le télégraphe optique
 - I.1.b. Le télégraphe électrique
 - I.1.c. Le téléphone
 - I.1.d. Télégraphie sans fil (TSF)
- I.2. Nouvelles technologies de communications : téléphonie mobile et l'Internet

II. Contexte et enjeux de la thèse

- II.1. Contexte de l'étude : les transmissions optiques
- II.2. Enjeux de la thèse

III. Bibliographie

Chapitre 2 : Conception d'une source haut débit

I. Introduction et rappel sur la modulation

- I.1. Introduction
- I.2. Modulation directe du laser
- I.3. Modulation externe au laser
 - I.3.a. Effet électro-optique
 - I.3.b. Effet électro-absorbant
 - I.3.b.i. Structure massive
 - I.3.b.ii. Structure à puits quantiques
 - I.3.b.iii. Les superréseaux
 - I.3.c. Choix du matériau
 - I.3.d. Modulateur électro-absorbant discret

II. Modulateurs à ondes progressives

- II.1. Présentation du principe
- II.2. La ligne de transmission
 - II.2.a. Ligne coplanaire (CoPlanar Waveguide : CPW)
 - II.2.b. Ligne microruban (microstrip)
 - II.2.c. Choix de la ligne de transmission
- II.3. Contraintes inhérentes aux composants : aspects électrique et optique
 - II.3.a. Indice de propagation électrique n_e /optique n_o
 - II.3.a.i. Influence de la différence d'indice sur la bande-passante
 - II.3.a.ii. Indice optique n_o
 - II.3.a.iii. Indice électrique n_e
 - II.3.b. Atténuation optique/électrique
 - II.3.b.i. Atténuation optique
 - II.3.b.ii. Atténuation électrique
 - II.3.c. Impédance
 - II.3.c.i. Aspect optique

- II.3.c.ii. Aspect électrique
- II.3.d. Contraintes extérieures
 - II.3.d.i. Simulation à partir du schéma électrique
 - II.3.d.i.1. Nécessité d'un driver adapté au composant
 - II.3.d.i.2. Présentation des possibilités TBH et HEMT
 - II.3.d.i.3. Adaptation à 50 Ohms
 - II.3.d.ii. Embases
 - II.3.d.ii.1. Montage classique "p-up"
 - II.3.d.ii.2. Montage flip-chip

III. Conclusion

IV. Bibliographie

Chapitre 3 : Technologie

I. Fabrication de composants ayant une structure guide d'onde en arête

- I.1. Epitaxie
- I.2. Couplage bout à bout ("butt-joint")
- I.3. Gravure localisée du réseau
- I.4. Epitaxie planaire de l'InP-p
- I.5. Dépôt métallique de titane (Ti) et d'or (Au)
- I.6. Formation du guide d'onde en arête (ou "ridge")
- I.7. Séparation électrique entre le laser et le modulateur
- I.8. Dépôt du polyimide et métallisation p
- I.9. Gravure et métallisation n
- I.10. Amincissement et métallisation face arrière
- I.11. Traitement optique des faces de sorties du composant

II. Bibliographie

Chapitre 4 : Mesures et analyses

I. Mesures statiques

- I.1. Caractéristiques du laser
- I.2. Taux d'extinction du modulateur
 - I.2.a. Formule du taux d'extinction
 - I.2.b. Détermination de l'atténuation optique α_0 à 0 V

II. Mesures dynamiques petit signal en large bande

- II.1. Paramètres de répartition S
- II.2. Présentation du banc de mesures pour des mesures petit signal classique
- II.3. Présentation des composants mesurés
- II.4. Extraction du modèle électrique
 - II.4.a. Structure du modèle électrique
 - II.4.b. Ordre de grandeur des paramètres électriques du modèle : étude en basse fréquence
 - II.4.b.i. Etude de l'admittance Y_{21} entre les ports 1 et 2 en basse fréquence
 - II.4.b.i.1. Résistance série R'_s
 - II.4.b.i.2. Inductance série L'
 - II.4.b.ii. Etude de l'impédance Z_{21} entre les ports 1 et 2 en basses fréquences
 - II.4.b.ii.1. Capacité parallèle C'
 - II.4.b.ii.2. Conductance parallèle G'
 - II.4.c. Valeurs des paramètres électriques : étude sur tout le domaine de fréquence
- II.5. Interprétation des mesures électriques
 - II.5.a. Paramètres de répartition S_{11}
 - II.5.b. Détermination de l'indice de propagation n_e
 - II.5.b.i. A partir du paramètre S_{21}
 - II.5.b.ii. A partir de l'ensemble des paramètres S
 - II.5.c. Interprétation de l'indice de propagation
 - II.5.c.i. Régime diélectrique
 - II.5.c.ii. Régime d'effet de peau
 - II.5.c.iii. Régime d'onde lente
 - II.5.d. Influence de la différence d'indice de propagation sur la conversion optique/électrique

- II.5.e. Atténuation électrique α
- II.5.f. Impédance caractéristique Z_c
- II.5.g. Amélioration du modèle électrique : dépendance des paramètres avec la fréquence
- II.6. Bande-passante électro-optique petit signal
 - II.6.a. Influence de l'effet électro-absorption sur la bande-passante
 - II.6.b. Influence du temps de transit des porteurs dans les MQWs sur la bande-passante
 - II.6.c. Bande-passante électro-optique petit signal

III. Conclusion

IV. Bibliographie

Chapitre 5 : Premier bilan sur les ILMTW sur InP

I. Comparaison TWM et LM

II. Influence de la différence d'indice sur les pulses optiques

III. Conclusion

Conclusion générale

Annexe 1 - "Hilal" Calcul de l'impédance caractéristique, l'atténuation et l'indice d'une ligne de propagation à partir du schéma électrique

Annexe 2 - "Ghione" Calcul analytique de l'impédance caractéristique et de l'indice effectif d'une ligne de propagation coplanaire

Annexe 3 - "Matrices de passage" Matrices de passage entre les paramètres S, Z, Y, H et ABCD

Annexe 4 - Mesures exhaustives

I ntroduction

L'ère de l'Internet et d'une société de communication basée sur les nouvelles technologies est en marche : révolution numérique, explosion de la demande de réseaux de télécommunications à forte capacité... Afin de comprendre les changements sociologiques et technologiques qui sont en cours, un point est fait sur le passé, à l'exemple d'Emile Baudot qui, dès la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle, inventa le système de temps partagé ou multiplexage temporel (TDM : Time Division Multiplexing) pour répondre au besoin de transmettre plus de mots.

La volonté de diffuser toujours plus d'informations est toujours d'actualité : ainsi, au multiplexage temporel, qui s'est diversifié puisqu'il est désormais optique (OTDM : Optic Time Division Multiplexing) et électrique (Electric Time Division Multiplexing), s'est ajouté le multiplexage en longueur d'onde (WDM : Wavelength Division Multiplexing). C'est dans le cadre de l'ETDM que s'inscrit cette thèse, en étudiant un composant optoélectronique visant à transmettre, sur une longueur d'onde ($\lambda=1.55 \mu\text{m}$), de hauts débits (40 Gbits/s et plus). Ce dernier est basé sur un modulateur électro-absorbant externe intégré à un laser. L'originalité de l'étude réside dans l'utilisation d'électrodes à ondes progressives lors de la conversion de la modulation électrique en modulation optique. Les chapitres successifs retracent la vie du composant.

Dans un premier temps, un bilan est fait sur les différentes possibilités d'augmenter les débits de transmission, afin de justifier le choix du modulateur à ondes progressives. Sa conception numérique prend en compte aussi bien les aspects optiques (propagation en onde guidée, efficacité optique...) qu'électriques (indice, atténuation, impédance caractéristique...) et également l'intégration du composant dans son environnement pour aboutir à un produit fini.

De la virtualité à la réalité, ainsi pourrait s'appeler le chapitre se rapportant à la technologie. Moment crucial dans la vie du composant, puisque, étapes après étapes, avec les défis technologiques qu'elles supposent, le composant est sculpté dans le cristal.

Puis, le chapitre "Mesures et analyses" s'intéresse à la source obtenue en étudiant ses caractéristiques statiques (puissance du laser, taux d'extinction du modulateur...) et dynamiques (bande-passantes électrique et électro-optique...). L'analyse nous permet de découvrir les secrets du monolithe.

Finalement et inévitablement, un premier bilan est réalisé sur le composant étudié en le comparant à une source possédant un modulateur externe à électrode discrète, autre solution pour transmettre de hauts débits. Est-il à la hauteur des espérances qu'on plaçait en lui ?

Conclusion générale

L'enjeu de cette thèse est de développer, à partir de matériaux semi-conducteurs III-V (InGaAsP), une source optoélectronique haut débit (40 Gbits/s et plus) constituée d'un modulateur électro-absorbant intégré à un laser émettant à 1.55 μm . L'originalité de l'étude réside dans la conversion de la puissance électrique en puissance optique qui s'opère grâce à une électrode à ondes progressives par opposition aux électrodes discrètes utilisées actuellement et qui ont atteint leurs limites. Pour cela, une première version de composants (ILMTW v.1) a été conçue numériquement, puis fabriquée. Par la suite, ces sources ont été mesurées et analysées pour en déduire la conception d'une nouvelle génération (ILMTW v.2). Enfin, les embases des deux versions, qui sont amenées à recevoir les composants les meilleurs, ont été simulées puis dessinées. Un investissement important sur l'amélioration du banc de mesures de bandes-passantes petit signal électrique et électro-optique, ainsi que sur l'optimisation des moyens de simulation numérique, a été nécessaire et a ainsi contribué au fonctionnement de l'unité.

Le chapitre 1 a permis de se plonger dans le monde des télécommunications et plus spécifiquement dans les transmissions sur fibre optique à haut débit (40 Gbits/s et plus), ainsi que d'introduire le sujet de la thèse.

L'objet du chapitre 2 a tout d'abord été de justifier le choix du composant : laser intégré à un modulateur à ondes progressives (ILMTW) basé sur des composés semi-conducteurs III-V (InGaAsP), puis de le concevoir. En effet, les matériaux semi-conducteurs ont l'avantage d'avoir des tensions de commande, et donc une consommation, plus faibles par rapport à celles du niobate de lithium. Par ailleurs, en complémentarité des sources actuellement développées et vendues, faisant appel à

un modulateur discret, nous avons utilisé le principe de l'électrode à ondes progressives. Il permet notamment de s'affranchir de la limitation en bande-passante due au produit RC des modulateurs discrets en distribuant la capacité le long d'une ligne de propagation. La théorie montre, qu'en faisant abstraction des pertes électriques, des bandes-passantes électriques infinies sont possibles, si les ondes optiques et électriques se propagent à la même vitesse. La conception s'est basée sur des composants réels en cherchant quels étaient les facteurs limitatifs de ces composants et ce que l'on pouvait en attendre. Elle a été menée en tenant compte aussi bien des aspects optiques (guide d'onde, efficacité optique) qu'électriques (atténuation, indice, impédance...). Une première version de composants (ILMTW v.1), utilisant une ligne microruban, a été conçue numériquement avec pour objectifs, non seulement d'égaliser les indices électrique n_e et optique n_o ($n_e=n_o=3.4$), mais aussi d'évaluer l'ordre de grandeur de la structure en termes d'impédance et d'atténuation. La réalisation (chapitre 3), la mesure et l'analyse (chapitre 4) ont par la suite permis de comparer les valeurs d'indice ($n_e^{\text{simulé}}=3.4$ et $n_e^{\text{expérimental}}=6.5$), d'atténuation électrique ($\alpha_e=1650\text{m}^{-1}$ à 40 GHz) et d'impédance ($Z_c^{\text{simulé}}=6$ Ohms et $Z_c^{\text{expérimental}}=17$ Ohms) avec celles escomptés. Nous avons mis en évidence les lacunes de la première conception basée sur des simulations électromagnétiques (HFSS v.4), pour rebondir et concevoir une seconde génération (ILMTW v.2), s'appuyant non seulement sur des simulations numériques (HFSS v.6), qui, cette fois, rejoignent les mesures effectuées sur la version 1, mais également sur un modèle électrique complet du composant validé sur les mesures et extrapolé pour concevoir la version 2.

La version 2 a pour but d'atteindre des impédances caractéristiques Z_c de 25 Ohms permettant ainsi d'obtenir un paramètre S_{11} de l'ordre de -10 dB, pour une plage de fréquence de 40 MHz à 40 GHz, une fois le composant adapté en sortie (résistance de charge égale à l'impédance caractéristique), et un gain transducique de 0.7. Les premières mesures donnent des valeurs proches de 25 Ohms et confirment ainsi la modélisation. Des indices de l'ordre de 4.7 sont fournis par la simulation, alors que nous obtenons des valeurs mesurées proches de 4.5, à comparer avec celles de l'indice optique voisines de 3.4. Néanmoins, cette différence

n'est pas critique pour obtenir de grandes bandes-passantes, comme nous l'avons démontré.

Enfin, l'atténuation simulée $\alpha_e^{\text{simulée}}$ est de 700 m^{-1} alors que celle mesurée $\alpha_e^{\text{mesurée}}$ est de 1000 m^{-1} , ce qui réduit la longueur de l'électrode de $715 \text{ }\mu\text{m}$ à $500 \text{ }\mu\text{m}$ pour une bande-passante électrique de 40 GHz . D'un point de vue optique, on peut s'attendre à des taux d'extinction statiques de -15 dB pour des longueurs de $500 \text{ }\mu\text{m}$.

En conclusion du chapitre 2, il est possible, moyennant des compromis, de réaliser un ensemble composant-embase proche de 50 Ohms , c'est-à-dire adapté au driver électronique, ayant une bande-passante de 40 GHz et un taux d'extinction supérieur à -13 dB , mais ceci au détriment de la tension de commande (4 V_{pp}). La conception de drivers électroniques basse impédance ($25 \text{ Ohms}/50 \text{ Ohms}$) permettrait d'éliminer la désadaptation et de transmettre la totalité de la puissance fournie par le driver au composant (gain transductique égal à 1).

Le chapitre 3 s'intéresse à la fabrication du composant photonique étudié, en présentant les différentes étapes technologiques. Cette partie, qui doit être totalement intégrée à la conception pour palier d'éventuels imprévus, met notamment en évidence les défis technologiques à relever, tels que l'une des spécificités de ce composant qui est de multiplier les dépôts métalliques.

L'avant-dernier chapitre se focalise plus particulièrement sur la mesure des composants et leur analyse. Nous avons à notre disposition, d'un point de vue statique, une source munie d'un laser monomode longitudinal ($\text{SMSR} > 30 \text{ dB}$) et transverse délivrant pour une longueur de modulateur de $180 \text{ }\mu\text{m}$, une puissance de sortie de 1 mW (0 dBm) à $1.55 \text{ }\mu\text{m}$. En ce qui concerne le modulateur, des taux d'extinction de 20 dB sont obtenus avec des tensions de polarisation de 2 V_{pp} .

D'un point de vue dynamique, une modélisation électrique complète des composants ILMTW v.1 a pu être obtenue à l'aide des paramètres de répartition S. Finalement, l'analyse du composant a permis de proposer une explication physique, à l'aide des différents régimes de propagation dans les semi-conducteurs, aux valeurs d'indice de propagation électrique et d'impédance caractéristique mesurées. Un voile

reste cependant à lever concernant la différence de bande-passantes électriques et électro-optiques mesurée.

Le chapitre final établit un premier bilan du composant étudié et montre, en simulation, la proximité, en termes de facteur de mérite (produit du gain en tension et de la longueur maximale pour obtenir une bande-passante de 40 GHz) avec le modulateur à électrode discrète. Néanmoins, une simple réduction de la largeur de l'électrode permettrait d'obtenir un gain de 30 % sur le facteur de mérite pour une épaisseur de zone intrinsèque de 0.34 μm (ILMTW v.1). Ses possibilités en termes de transmission restent à être étudiées.

Des idées préconçues sur le modulateur à ondes progressives sur InP laissaient présager pour ce dernier, en faisant abstraction des pertes électriques et de la différence d'indices électrique et optique, des bandes-passantes électriques infinies. La conception, la fabrication et les mesures du composant ILMTW présentées au cours de cette thèse donnent une analyse concrète. On retiendra, par conséquent, de cette thèse :

- l'importance, d'une part, de l'impédance caractéristique Z_c qui limite la puissance électrique fournie au composant par un driver électronique d'impédance interne 50 Ohms, et, d'autre part, de l'atténuation électrique α_e qui impose la longueur de l'électrode pour une bande-passante fixée ;
- la faible influence de la différence d'indice $n_e - n_o$, compte tenu des longueurs d'électrodes inférieures à la longueur d'onde électrique à 40 GHz ;
- une modélisation électrique complète du modulateur à ondes progressives à l'aide des paramètres R, L, C et G ;
- la possibilité de connaître chaque paramètre R, L, C et G du modèle uniquement grâce à une section en deux dimensions de la ligne de propagation.

- Carré P. Carré, Du tam-tam au satellite, *Presses Pocket*.
- Internet 2 A Short History of Telegraphy, samhallas.cwc.net/telhist1/telehist.htm.
- Internet 3 Telegraphy, alpcorn.it/hamradio/storeng.html.
- Internet 4 L'histoire des télécommunications,
francetelecom.fr/vfrance/apropos/grp-corp5.htm.
- Internet 5 Les télécommunications en France depuis 1794,
leradome.com/mt_150ans/hdocs/mtp01.htm.
- Robin G. Robin, Les télécommunications, *Presses Universitaire de France*.
- Chappe C. Chappe, savants.citeweb.net/chappe1.htm.
- Internet 1 Background, theory and construction of the electric,
chss.montclair.edu/psychology/perera/pertel.html.
- téléphone Collections de téléphones amateurs, members.aol.com/l2l1/index.htm.
- TSF Télégraphie sans fil, pascalsimeon.free.fr/tsf.htm.
- Bertaina A. Bertina, Contribution à l'étude de l'impact des caractéristiques de la fibre de ligne sur la performance des transmissions optiques à très haut débit utilisant le multiplexage en longueur d'onde, *Thèse de doctorat de l'université Paris-Sud, 2000*.
- Zhao X. Zhao, 10 Gb/s Multimode Fiber Transmissions over any (loss limited) distances using adaptive equalization techniques, *ECOC'00*.
- Lesterlin D. Lesterlin, Integrated Laser/Modulator for 10 Gbit/s systems, *ECOC'96*.
- Delprat D. Delprat, High performance DFB laser-electroabsorption modulator based on the identical active layer approach and application to 10 Gbits/s transmission over 125 km of SMF, *ECOC'97*.
- Ramdane A. Ramdane, High performance strained layer integrated laser-modulator for 20 Gbits/s transmission, *ECOC'96*.
- Yoshino K. Yoshino, 40 Gbits/s operation of InGaAs/InAlAs MQW electroabsorption modulator module with very low driving-voltage, *ECOC'96*.
- Takeuchi H. Takeuchi, NRZ operation at 40 Gbits/s of a compact module with an MQW electroabsorption modulator integrated DFB laser, *ECOC'96*.

- Noguchi **Noguchi**, Low-voltage and broadband Ti:LiNbO₃ modulators operating in the millimeter wavelength region, *OFC'96*.
- Bowers2000 **J. Bowers**, High Speed Semiconductor Lasers, *OFC'2000, Short Course 148*
- Dagli99 **N. Dagli**, Wide-bandwidth lasers and modulators for RF photonics, *IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Vol. 47, No 7, July 1999*.
- Morton94 **P. A. Morton**, Packaged 1.55 μ m DFB laser with 25 GHz modulation bandwidth, *Electronic Letters, Vol. 30, pp 2044-2046, 1994*.
- Brillouet **F. Brillouet**, 10 Gbits/s InP-based Mach-Zehnder modulator, *Plaquette de présentation Alcatel Telecom*
- Delansay **P. Delansay**, 10 Gbits/s transmission over 90 to 127 km in the wavelength range of 1530~1560 nm using an InP-based Mach Zehnder modulator, *Electronics Letters, July 1996*
- Noguchi 96 **Noguchi**, Low voltage and broadband Ti:LiNbO₃ modulators operating in the millimeter wavelength region, *OFC'96*
- Bigan **E. Bigan**, Etude des effets d'électro-absorption en onde guidée pour la modulation d'intensité lumineuse à 1.5 μ m, *Thèse de doctorat Université de Paris-Sud, 1991*
- Devaux **F. Devaux**, 20 Gbits/s operation of a high efficiency InGaAsP/InGaAsP MQW electroabsorption modulator with 1.2 V drive voltage, *IEEE Photonics Technology Letters, Vol 5, No 11, November 1993*
- Johnson **J.E. Johnson**, Monolithically integrated semiconductor optical amplifier and electroabsorption modulator with dual-waveguide spot-size converter input, *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, Vol. 6, No 1, Jan. 2000*
- Yoshino 99 **K. Yoshino**, Compact and stable electroabsorption optical modules, *Journal of Lightwave Technology, March 1999*
- Optronics Alcatel 1905 LMI, High bit rate terrestrial discrete components, <http://www.europe.alcatel.fr/telecom/optronics/products.htm#hibit>

- Kaminow I. P. Kaminow, Propagation characteristics of partially loaded two conductor transmission line for broadband light modulation, *Proc IEEE*, vol. 51, pp. 132-136, January 1963
- Izutsu 77 M. Izutsu, Broad-band traveling wave modulator using a LiNbO₃ optical waveguide modulator, *IEEE J. Quantum Electronics*, vol QE-13, pp 287-290, April 1977
- Izutsu 78 M. Izutsu, 10 GHz bandwidth traveling wave LiNbO₃ optical waveguide modulator, *IEEE J. Quantum Electronics*, vol QE-14, pp 394-395, June 1978
- Bakoglu Bakoglu, Circuits, interconnections and packaging, *Addison-Wesley, Reading, Masson 1990*
- Badoual Badoual, Les micro-ondes Tome I Circuits, microrubans, fibres, *Collection Technologies, Edition Masson*
- Mörl L. Mörl, Traveling wave electrodes for 50 GHz operation of optoelectronic devices on InP, *11th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, WeA1-3, 16/20 May 1999*
- Sumitomo Sumitomo Osaka Cement, Modulateur électro-optique, Débit = 40 Gbits/s, Tension de commande = 6 Vpp
- Djupsjö A. Dsjupsöbacka, Traveling Wave Modulators in Lithium Niobate, *Royal Institute of Technology, Ph.D. Thesis 1995*
- Mörl99 L. Mörl, Traveling wave electrodes for 50 GHz operation of optoelectronic devices based on InP, *11th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, WeA1-3, 16-20 May 1999, Davos*
- Ghione87 G. Ghione, Coplanar Waveguides for MMIC applications: effect of upper shielding, conductor backing, finite-extent ground planes, and line-to-line coupling, *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, Vol. MTT-35, No 3, March 1987
- Jaeger92 N. A. F. Jaeger, Slow-wave electrode for use in compound semiconductor electrooptic modulators, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 28, No 8, August 1992

- Jaeger96 N. A. F. Jaeger, Velocity-Matched electrodes for compound semiconductor traveling-wave electrooptic modulators: experimental results, *IEEE Microwave and Guided Wave Letter*, Vol. 6, No 2, February 1996
- Hilal96 R. Hilal, Méthode de conception des amplificateurs distribués de puissance à TECs en montage source commune et cascode dans le domaine des fréquences millimétriques, *Thèse de doctorat, Université de Limoges, Mars 1996*
- Mada97 R. Madabhushi, High Speed LiNbO3 modulators for telecommunications, *ECOC'97, RtuK5-1*
- Chilo83 J. Chilo, Les interconnexions dans les circuits intégrés logiques rapides : outils de modélisation et d'analyse temporelle, *Thèse de doctorat, INPG Grenoble, Décembre 1983*
- Bouché97 M. Bouché, Mise en œuvre d'une méthode de conception de circuits et modules à base de transistors bipolaires à hétérojonction appliquée à des circuits à 20 Gbits/s, *Thèse de doctorat de l'université de Paris XI Orsay, 6 janvier 1997*
- Kauffman99 N. Kauffmann, Méthodologie de conception de circuits intégrés haut débit en technologie TBDH InP pour les communications optiques à 40 Gb/s, *Thèse de doctorat de l'université de Paris XI Orsay, 29 novembre 1999*
- Thiam98 A. Thiam, 40 Gbits/s GaAs P-HEMT driver module for optical communications, *Electronics Letters*, 12th November 1998, Vol. 34 No. 23
- Legros97 E. Legros, "Distributed Amplifier", *French Patent no 9701544, 11 February 1997*
- Boucart99 J. Boucart, Conception et élaboration de lasers à cavité verticale à 1.55 μm pour les télécommunications optiques, *Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, Juin 1999*
- Delprat97 D. Delprat, Etude de sources intégrées lasers-modulateurs pour transmission optique à haut débit, *Thèse de doctorat de l'université Paris VI, Juillet 1997*

- Suzuki87 M. Suzuki, Monolithic integration of InGaAs/InP distributed feedback laser and electroabsorption modulator by vapor phase epitaxy, *J. Light. Tech, Vol.5, p 1277, 1987*
- Jacquet92 J. Jacquet, Contribution à l'étude de lasers à semi-conducteurs multisections émettant à 1.5 μm accordables en longueur d'onde, *Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, 24 Juin 1992*
- Delprat97 D. Delprat, Etude de sources intégrées lasers-modulateurs pour transmission optique à haut débit, *Thèse de doctorat de l'Université Paris VI, 7 Juillet 1997*
- Miller88 S.E. Miller, The influence of power level on injection laser linewidth and intensity fluctuations including side mode contributions, *IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 24, N°9, Sept. 1988*
- Devaux93 F. Devaux, Fabrication, caractérisation et mise en œuvre des modulateurs électro-absorbant en onde guidée à 1.55 μm pour les liaisons très haut débit, *Thèse de doctorat de l'université Paris XI Orsay, Mars 1993*
- Badoual84 R. Badoual, Les Micro-ondes I Circuit-Microrubans-Fibres, *Collection Technologies, Edition Masson 1984*
- Zhang98 K. Zhang, Electromagnetic theory for microwaves and optoelectronics, *Springer Verlag 1998*
- Li99 G. L. Li, Ultra-high speed traveling wave electroabsorption modulator - Design and Analysis, *IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Vol. 47, N°7, July 1999*
- Campo93 M. Campovecchio, Méthodes de conception d'amplificateurs de puissance micro-ondes large bande à transistors à effet de champ. Application aux amplificateurs distribués en technologie MMIC, *Thèse de doctorat de l'université de Limoges, Janvier 1993*
- Wadell91 B. C. Wadell, Transmission Line Design Handbook, *Artech House Boston London 1991*

- Hasegawa71 H. Hasegawa, Properties of microstrip line on Si-SiO₂, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-19, No 11, November 1971
- Guckel67 H. Guckel, A parallel-plate waveguide approach to microminiaturized, planar transmission lines for integrated circuits, *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, Vol. MTT-15, No 8, August 1967
- Yuan90 J. Yuan, A novel lossy and dispersive interconnect model for integrated circuit simulation, *IEEE Transactions on components, hybrids and manufacturing technology*, Vol. 13, No 2, June 1990
- Gartner59 W.W. Gartner, Depletion layer photoeffects in semiconductors, *Physic Review*, Vol 116, pp 84-87, 1959
- Devaux95 F. Devaux, Electroabsorption modulators for high bit rate optical communications, *Semiconductor Sci. Technol. Vol.*, pp 887-901, 1995
- Suzuki88 Suzuki, Effect of hole pile-up at heterointerface on modulation voltage in InGaAsP electroabsorption modulator, *Electronics Letters*, p 89, Vol. 25, 1989
- Fox91 A. M. Fox, Quantum well carrier sweep out : relation to electroabsorption and exciton saturation, *IEEE J. Quantum Electron.*, p 2281, Vol. 27, 1991
- Wood90 T.H. Wood, Electric field screening by photogenerated holes in MQW : a new mechanism for absorption saturation, *Appl. Phys. Lett.*, p1081, Vol. 57, 1990
- Hilal96 R. Hilal, Méthode de conception des amplificateurs distribués de puissance à TECs en montage source commune et cascode dans le domaine des fréquences millimétriques, *Thèse de doctorat, Université de Limoges*, 19 Mars 1996
- Veyres80 C. Veyres, Extension of the application of conformal mapping techniques to coplanar lines with finite dimensions, *Int. J. Electronics*, 1980, Vol. 48, No 1, 47-56
- Ghione87 G. Ghione, Coplanar waveguides for MMIC applications: effect of upper shielding, conductor backing, finite-extent ground planes, and line-to-line coupling, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-35, No 3, March 1987