



Mécanismes de dégradation des dispositifs à semiconducteurs composés III-V et SiGe - Impact sur la sécurité de fonctionnement et la fiabilité

Coordinateurs : N. Labat (IXL-UMR CNRS 5818 - Université Bordeaux 1 - labat@ixl.u-bordeaux.fr),
J.M. Dumas (ENSILimoges - dumas@ensil.unilim.fr)

1/ Introduction

Les récents développements de circuits intégrés III-V fonctionnant dans les gammes micro-ondes, millimétriques et numériques large bande sont incités par l'évolution des technologies de l'information et par l'expansion de nouveaux services offerts par les réseaux de communication mobile. A l'heure actuelle, le spectre radioélectrique s'étend de 1 GHz jusqu'à 80 GHz et même au-delà pour les communications utilisant l'optique comme moyen de transport. Les impératifs sont très forts en termes de performances (linéarité, débit, TEB, bruit, fiabilité) et cela se traduit par des composants fonctionnant à « leur limite ». Il est donc primordial de pouvoir définir des aires de sécurité de fonctionnement optimisées en terme de fiabilité, ce qui devient possible par une connaissance améliorée des mécanismes de dégradation, de leur activation et de leur localisation.

Une des bases de l'intégration de la fiabilité soit dans la conception soit dans les choix technologiques associés à une application est de s'attacher à modéliser l'interaction "performance-contrainte" en fonction des profils de mission. Des résultats significatifs sur les nouvelles approches de la fiabilité notamment en développant des modèles avancés de dégradation, des indicateurs précoces de défaillance, et des techniques de localisation de défauts commencent à donner des résultats prometteurs.

2/ Domaines d'applications - Pour le futur proche, les dispositifs à hétérostructures III-V et SiGe offrent des performances attractives, non seulement pour des applications militaires et spatiales mais surtout pour de nombreuses applications commerciales. Les capteurs pour véhicules et plus généralement les systèmes intelligents de navigation constituent un marché potentiel important pour lequel des technologies, à faible coût et hautes performances, sont exigées. L'augmentation du débit des communications par fibre optique, actuellement de 2,5 à 10 Gbits/s et atteignant 40 Gbits/s en expérimentation réelle, résulte, outre la bande passante de la fibre, des performances des modules d'extrémités optoélectroniques.

La plupart des applications récentes, en particulier le téléphone cellulaire à 0,9 et 1,8GHz utilisent des technologies SiGe ou basées sur le MESFET et le HEMT GaAs. La technologie des HEMTs pseudomorphiques (P-HEMT) est relativement bien placée pour faire face aux réalités économiques, tant en terme de coût des tranches épitaxiées que de rendement et de fiabilité. Pour les applications large bande en développement, en particulier dans le domaine du multimédia, la technologie bipolaire à hétérojonction (TBH) se signale également par ses caractéristiques appropriées, en puissance, en linéarité et en bruit.

La forte croissance du débit des systèmes de télécommunication par fibre optique est lié à une avancée technologique majeure : le multiplexage en longueur d'onde (WDM). Le WDM repose sur la propriété des fibres de pouvoir supporter plusieurs longueurs d'onde, porteuse chacune de signaux indépendants. Par exemple, en considérant uniquement la fenêtre comprise entre 1530 et 1560 nm où l'atténuation de la fibre est minimale, cette technique permet d'envoyer 50 canaux indépendants espacés de 0,8 nm (ou 100 GHz) sur une seule fibre. Depuis 1995, les réseaux terrestres et sous-marins déjà installés migrent vers le WDM pour faire face à la demande en bande passante et les nouveaux réseaux installés actuellement sont uniquement implantés avec cette technologie.

3/ Evolution des technologies

3/a/ Composants sur substrats GaAs et InP

Contrastant avec la stabilité des technologies HEMTs faible bruit, l'amélioration des performances des FETs sur GaAs pour les applications de puissance a suscité des évolutions technologiques, telles les structures à double « recess » de grille et le choix de matériaux favorisant le confinement des électrons dans le canal et leur mobilité, l'optimisation de la concentration de porteurs et l'insertion des plans de dopage. On note également que le transistor bipolaire à hétérojonction sur GaAs, suscite un fort intérêt de par sa linéarité de fonctionnement pour l'amplification de puissance large bande ainsi que pour des fonctions de type oscillateur à faible bruit de phase ou amplificateur sous faible tension.

Dans le domaine millimétrique, le développement des HEMTs basés sur l'hétérojonction AlInAs/InGaAs sur substrat InP est motivé par des performances supérieures à celles des HEMTs pseudomorphiques sur GaAs et par les besoins d'applications telles les communications mobiles par satellites et les systèmes de radars anti-collision. On recherche une amélioration du confinement des porteurs dans le canal, de la mobilité électronique et de la vitesse de dérive par une augmentation de la fraction molaire des éléments In et As dans les HEMTs sur InP et les HEMTs métamorphiques.

3/b/ Composants à base de SiGe

En ce qui concerne le silicium, son apparition dans le domaine des communications sans fil s'est faite grâce aux possibilités d'ingénierie de bande interdite offertes par les alliages de silicium et de germanium. L'ajout de germanium bien maîtrisé permet à la fois d'augmenter les performances fréquentielles tout en conservant des performances au niveau du bruit équivalentes à celle reportées pour les composants à base de silicium. De plus, différentes options technologiques peuvent être choisies, certaines agressives en terme de taux de germanium qui permettent d'obtenir des fréquences de fonctionnement millimétriques pour des composants de dimensions comprises entre 0.8 μm et 2 μm et d'autres présentant des taux de germanium plus faibles mais qui présentent l'avantage d'être compatibles avec des procédés CMOS et qui autorisent la réalisation de circuits micro-ondes mixtes (analogique et digital). Pour ces derniers types de composants, les performances fréquentielles, en linéarité et en bruit sont obtenus par des réductions des dimensions et par des optimisations des profils de germanium. A l'heure actuelle, les performances fréquentielles sont supérieures à 200 GHz pour des composants de largeurs d'émetteur de l'ordre de 0,13-0,18 μm .

Un autre aspect des évolutions des technologies silicium germanium est lié à l'optimisation simultanée des performances fréquentielles analogiques et digitales qui se traduit par une réduction verticale des dimensions qui pose des problèmes de confinement des dopages. Ces problèmes sont résolus par l'ajout d'une fraction de carbone qui permet de limiter les phénomènes de diffusion des dopants de base.

3/c/ Fiabilité des technologies CMOS ultimes

La réduction des dimensions des transistors MOS à effet de champ implique la réduction de l'épaisseur du diélectrique de grille de ces composants. Les technologies CMOS ultimes devraient intégrer des diélectriques de grille d'épaisseur inférieure à 1 nm. A l'heure actuelle, le diélectrique de grille utilisé dans les composants de générations 130 à 90 nm est l'oxynitride de silicium (SiON), l'incorporation d'azote dans l'oxyde de silicium étant nécessaire à la prévention de la pénétration du bore dans le matériau lors du dopage de la grille de polysilicium. Toutefois, il a été récemment mis en évidence que la présence d'azote dans l'oxyde accélère la dégradation des transistors p-MOS sous contrainte NBTI (negative bias temperature instability). Cet effet étant mal compris, nous proposons de caractériser et modéliser l'impact de l'azote sur la dégradation de ces composants. Le modèle tiendra compte de la génération de défauts à l'interface Si/SiON lors de la contrainte NBTI et de l'augmentation de la contrainte à cette interface liée à la présence de l'azote.

D'autre part, les technologies CMOS ultimes (générations à 80 nm et en dessous) devraient intégrer des diélectriques de grille à forte permittivité (matériaux high-k), tels que l' Al_2O_3 , le ZrO_2 ou le HfO_2 . Cependant, très peu de travaux ont été consacrés à l'étude de la fiabilité de ces matériaux. Par conséquent, nous proposons de caractériser la dégradation de ces isolants de grille sous différents

modes de contraintes électriques : injection uniforme de porteurs par effet tunnel, injection de porteurs chauds, contrainte NBTI. Un modèle physique de génération de défauts dans ces composants sera élaboré, modèle qui devra être validé en le comparant avec divers résultats expérimentaux. Ce modèle sera ensuite utilisé pour prédire la durée de vie des composants dans les circuits.

3/d/ Composants et modules optoélectroniques

Le domaine de l'optoélectronique, par l'intermédiaire des télécommunications, devient un secteur clef dans les applications de la microélectronique. Cette tendance va s'accroître avec comme objectif à terme des liaisons intra et inter-systèmes "tout optique". Les modélisations comportementales constituent également un élément essentiel dans cette approche permettant d'augmenter la robustesse des technologies plus matures et fournir des éléments de fiabilité opérationnelle.

L'accroissement de l'intégration des fonctions électroniques et optiques dans un même boîtier et l'augmentation des performances ont abouti à la fabrication de modules discrets à haut débit pour des applications numériques et analogiques et de modules intégrés pour des applications SDH et ATM. Leur caractéristique essentielle réside dans la nécessité de couplage de la diode Laser et de la fibre optique monomode qui requiert un alignement submicronique (0,1 μm). La stabilité de ce couplage en conditions opérationnelles nécessite alors d'intégrer un certain nombre d'expertises : optiques, métallurgiques, thermomécaniques et surtout de fiabilité

Les technologies des composants et modules émissifs pour ces applications sont encore, pour certaines, en phase de mûrissement et en forte évolution. Il existe donc un besoin important d'évaluer ces technologies de façon comparative et d'analyser, en fonction des contraintes apportées par différents profils de mission, les mécanismes de dégradation génériques souvent reliés à une activation en température ou en courant, notamment :

- défauts d'interface ou de reprise d'épitaxie,
- diffusion de centres recombinants dans la zone active du composant,
- dérive du couplage optique dans un module.

Les composants optoélectroniques émissifs font appel à de la haute technologie de dépôt de couches (épitaxie) et à des expertises aux multiples facettes. Les récentes technologies de diodes Laser monochromatiques DFB 1.55 μm sur substrat InP (Distributed FeedBack) impliquent la gravure d'un ruban dans la couche active (InGaAsP) et la croissance d'InP permettant de définir la cavité optique, de diminuer le courant de seuil et d'augmenter le confinement optique. La gravure du ruban, typiquement d'un micron de large et de quelques centaines de microns de long, est faite selon un procédé RIBE (Reactive Ion Beam Etching). Ces diodes Laser monomode, contrairement aux cavités Fabry-Pérot multimodes, nécessitent en plus la gravure d'un réseau submicronique (pas de l'ordre de 100 nm) sous ou sur la cavité optique.

Pour les systèmes d'émission-réception optoélectroniques, la nécessité d'abandon des régénérateurs électro-optiques au profit des technologies d'amplificateurs optiques directs a permis d'augmenter très nettement les capacités des liaisons. Parmi ces technologies, l'élément essentiel est l'amplificateur à fibre dopé Erbium (EDFA) compte tenu de son gain élevé (50 dB) sur une large bande passante, sa puissance de saturation très élevée (1,5 W), son faible facteur de bruit (3 dB), son insensibilité à la polarisation et ses faibles pertes de couplage fibre à fibre. Le projet KEOPS, démontrant la faisabilité de commutation et de routage tout optique à très haut débit, a mis en lumière le fort intérêt d'un nouveau type d'amplificateur optique à base de semiconducteur (SOA). L'atout majeur de ce composant réside dans sa densité d'intégration et sa forte largeur spectrale (60 nm), appréciable pour des applications consommant de la bande passante. Le champ d'applications des SOA adresse les étages amplificateurs à la sortie des diodes Laser ou en entrée de photodétecteurs mais aussi des applications plus complexes à forte intégration comme les portes rapides en commutation et du fait de leur non-linéarité de gain, la conversion de longueur d'onde et le démultiplexage.

4/ Objectifs de l'action spécifique

Les exigences du marché grand public telle que la banalisation des contraintes environnementales imposées à l'électronique portable et embarquée impliquent l'émergence d'une approche renouvelée de la fiabilité, qui peut être qualifiée de fiabilité opérationnelle.

Pour les applications terrestres, en dépit de la complexité croissante de ces technologies, les niveaux de fiabilité exigés doivent être inférieurs à 500 FIT sur 15 ans et pour les applications sous-marines, les niveaux descendent au-dessous de 100 FIT sur 25 ans compte tenu de la difficulté et des coûts de maintenance de ces systèmes.

Parmi les problèmes spécifiques rencontrés lors de l'évaluation de la fiabilité de ces technologies, on met également en évidence le degré de maturité très différent des technologies à évaluer et le faible nombre de composants sous test.

Nous avons identifié trois thématiques prioritaires.

4/a/ Caractérisation électrique des effets parasites et des mécanismes de dégradation

Pour les applications non linéaires utilisant le HEMT, la connaissance des caractéristiques des composants et la pertinence des modèles électriques utilisés sont requises par les concepteurs et passent par la caractérisation et la modélisation des effets parasites se produisant dans les différents régimes de fonctionnement. De ce point de vue, la prise en compte du mécanisme d'ionisation par impact dans le canal est incontournable. En effet, ce mécanisme détermine la tension de claquage du dispositif en fonctionnement à canal ouvert et apparaît comme un facteur limitatif du domaine de fonctionnement. De plus, la fiabilité de ces dispositifs, tant la qualité de la structure épitaxiale que la qualité des contacts, ohmique et redresseur, a largement été démontrée. Les études de fiabilité se concentrent donc sur l'influence de l'ionisation par impact, en tant qu'effet parasite potentiellement à l'origine de mécanismes de dégradation intrinsèques.

Modélisation de deux processus physiques à l'origine du vieillissement des dispositifs micro et optoélectroniques

L'IEF se propose de réaliser des modélisations de plusieurs processus physiques de nature à fortement accélérer le vieillissement des dispositifs micro ou optoélectronique : l'ionisation par choc et l'auto échauffement.

Afin de réaliser une modélisation pertinente du processus d'ionisation par choc, dans les dispositifs microélectroniques et optoélectroniques, dans des simulateurs commerciaux par le jeu d'équations dit « energy balance », il faut préalablement disposer des coefficients d'ionisation en fonction de l'énergie des porteurs. L'IEF a développé une technique de résolution de l'équation de Boltzmann en régime d'ionisation par choc qui s'appuie sur une description très précise des bandes d'énergie dans toute la zone de Brillouin. Nous obtenons cette description par une approche kp 20 bandes. Une modélisation des densités spectrales de bruit associés à ce processus doit être menée.

Concernant l'auto échauffement, l'expertise de l'IEF portera sur les bilans microscopiques d'énergie qu'il faut prendre en considération, lors de la modélisation thermique de dispositifs HEMT ou TBH pour les applications micro-ondes et optoélectroniques.

Les résultats tirés des simulations numériques seront confrontés aux résultats expérimentaux obtenus à l'IEF et dans d'autres laboratoires. Particulièrement, des analyses en régime statique ou impulsif, des mesures micro-ondes et de bruits HF, ainsi que des mesures d'électroluminescence pourront être réalisées à l'IEF, qu'ils s'agissent de HEMT ou de TBH, des filières VI-VI ou III-V. L'analyse pourra être menée à température cryogénique avec l'aide d'un nouveau cryostat à gaz d'échange qui permet d'atteindre 1,5K.

Des modélisations de dispositifs peuvent également être effectuées à l'IEF sous ISE ou sous Silvaco.

Identification des mécanismes de dégradation dans les couches contraintes

Dans les couches contraintes, des modes de dégradation divers peuvent apparaître qui sont liés au type de composants étudiés. Il est en particulier évident que les composants verticaux et horizontaux ne présenteront pas les mêmes modes de défaillance. Ainsi, sur les composants bipolaires, des mécanismes de dégradations peuvent apparaître en surface (recombinaison), dans la base due à des phénomènes de diffusion des dopants. Les identifications de ces mécanismes de dégradations

demandent à dimensionner des types de contraintes adaptées ainsi que des techniques de caractérisations spécifiques qui permettront de mieux les localiser. Ainsi, la caractérisation des générateurs de bruit basse fréquence incluant la corrélation en fonction de divers paramètres comme la température, les dimensions et la polarisation permettront de localiser les endroits sensibles et les endroits dégradés du composant.

Pour les composants à effet de champ, une méthodologie analogue sera poursuivie. En particulier, l'étude de la corrélation entre courant de grille et courant de drain devrait permettre de lever certains doutes quand à la localisation des mécanismes de dégradation.

Cependant, une autre technique pourrait être envisagée qui consiste à étudier en plus des véhicules de test afin de confirmer ou d'infirmer les résultats obtenus sur les composants eux-mêmes.

4/b/ Détection précoce de dégradations par l'analyse du bruit basses fréquences et par électroluminescence

Détection de l'ionisation par chocs

Le modèle expérimental de la densité spectrale de bruit en courant de grille en régime d'ionisation par impact établi à l'IXL pour deux technologies FETs sur GaAs a montré que cette grandeur physique est un indicateur significatif de l'ionisation par choc. Ce sont des évolutions des propriétés physiques de la surface au voisinage de la grille et dans les zones d'accès qui peuvent être détectées par l'évolution du bruit en excès de grille.

Les seuils d'ionisation par choc obtenus par électroluminescence pourront être confrontés à ceux issus des mesures de bruit BF.

Détection précoce de dégradations

Les mesures de bruit base fréquence sont un outil précieux pour étudier le fonctionnement d'un point de vue microscopique. L'idée de base est de mettre en évidence une corrélation entre une mesure de bruit avant dégradation et l'existence d'un mécanisme de dégradation « latent ». Ceci permettrait de pouvoir faire des tris « à priori » des composants et éviterait des campagnes de vieillissement longues et coûteuses. Dans ce cadre, nous pensons que des études sur des composants et des véhicules de test en fonction de la température, de la polarisation et de la géométrie et/ou de la technologie permettront d'isoler les sources de bruit et ainsi de prévoir quelque type de composant sera plus sensible à la contrainte qu'un autre. L'objectif est de développer des outils de prédiction de la fiabilité les moins coûteux possible.

4/c/ Validation des critères de fiabilité par la simulation système de liaisons optiques à 2,5 Gbit/s (réseaux métropolitains) et 40 Gbit/s (réseaux de transport)

Les finalités de l'étude sont centrées sur l'influence de la variabilité des paramètres fonctionnels des composants induite par la dispersion technologique, les dysfonctionnements et les dégradations dues aux contraintes des profils de mission) sur les performances des systèmes de transmission optique. Cette évaluation fait l'objet d'un thème de recherche développé par Jean-Michel DUMAS (UMOP/ENSIL-Université de Limoges) portant sur la simulation comportementale des systèmes optoélectroniques avec lequel une collaboration a débuté.

Les objectifs de cette étude et les développements envisagés concernent:

- la caractérisation des paramètres électriques des transistors, HEMT et HBT sur GaAs et InP, susceptibles de pénaliser les performances des modules d'émission et de réception lors de leur insertion en système. En particulier, il a été montré que le bruit d'entrée du transistor d'amplification dans le module réception intervient dans le bilan des contributions au bruit ramené à l'entrée du photorécepteur et dégrade la sensibilité à la réception.
- L'évaluation, en fonction des mécanismes de dégradation identifiés, de la fiabilité de composants optiques émissifs IR et à haut débit soumis à des contraintes environnementales à partir de signatures précoces de défaillances. Nous avons développé un banc spécifique de caractérisations électro-optiques statiques basée sur un monochromateur permettant de mesurer le spectre optique $L(\lambda)$ à 0,1 Å, de puissance optique $P(I)$ absolue jusqu'à 10^{-6} W, de mesures $I(V-T)$ jusqu'à 10^{-12} A

entièrement automatisées en fonction de la température (de -200 °C à + 125 °C). La démarche basée sur des vieillissements accélérés permet une identification des paramètres électriques relatifs à un modèle équivalent et de paramètres optiques susceptibles de dériver en fonction du vieillissement des composants. Le but est de mettre en lumière des signatures précoces de défaillance à partir de l'identification des dégradations et de la connaissance des lois physiques régissant les mécanismes de défaillance. En collaboration avec ALCATEL Optronics, nous avons pour objectif d'apporter des informations sur les mesures complémentaires en régime dynamique (RIN, $\Delta\lambda$, BER, t_r , t_f , ...) sur des diodes laser DFB 1,55 μm , paramètres électriques précoces susceptibles d'évoluer en fonction du vieillissement, complémentaires des mesures I-V-P afin de réduire le nombre de tests accélérés.

L'ensemble des paramètres accessibles sur une diode laser permettra ensuite de quantifier l'impact de la dérive des paramètres électro-optiques d'un système complet d'émission-réception par fibre optique à partir de simulations comportementales et de prédire leur durée de vie en fonction des applications.

5/ Résultats attendus

Les retombées attendues pour cette action sont décrites ci-dessous.

- Une coordination étroite et une mutualisation des recherches entre les laboratoires constituant l'action spécifique. Notamment, cette action concertée devrait avoir des retombées très rapides sur la production et la publication de résultats scientifiques convergeant vers une meilleure évaluation de la fiabilité.
- Pour les technologies en développement, la boucle courte instituée par cette action spécifique entre les laboratoires universitaires et les fabricants doit avoir un impact rapide sur l'optimisation de la fiabilité par rapport à des profils de mission spécifiques.
- La création d'une base de connaissances sur le serveur du RTP « Fiabilité » pour l'élaboration de stratégies de test en vue de la qualification des composants.
- La modélisation de lois de dégradation et l'estimation de durées de vie des technologies étudiées.
- La préparation en vue d'une participation au 6^{ème} PCRD au sein d'un Réseau d'Excellence.

Laboratoires universitaires participant à cette action spécifique :

LAAS-CNRS, - J. Graffeuil, R. Plana

IXL, UMR CNRS, N. Labat, N. Malbert, C. Maneux, A. Touboul, L. Béchou, Y. Danto

IEF, UMR CNRS, F. Aniel, N. Zerounian, G. Fishman

UMOP, ENSIL, J.M Dumas, C. Aupetit

L2MP, UMR-CNRS, M. Houssa, J.L. Autran

Partenaires industriels :

Association ANADEF, groupe commun Université-entreprises

STMicroelectronics

THALES R&T

OPTO+/Alcatel CIT

Alcatel Space Industry