PolyPublie
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Réalisation de contacts ohmiques sur phosphure d'indium de types N et P
Auteur: Author:	Gilbert Lefebvre
Date:	1996
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Lefebvre, G. (1996). Réalisation de contacts ohmiques sur phosphure d'indium de types N et P [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/9000/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/9000/
Directeurs de recherche: Advisors:	Romain Maciejko
Programme: Program:	Non spécifié

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

RÉALISATION DE CONTACTS OHMIQUES SUR PHOSPHURE D'INDIUM DE TYPES N ET P

GILBERT LEFEBVRE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE PHYSIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE PHYSIQUE)
DÉCEMBRE 1996

© Gilbert Lefebvre, 1996.

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Acquisitions and Bibliographic Services
Acquisitions et services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-26492-0

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

RÉALISATION DE CONTACTS OHMIQUES SUR PHOSPHURE D'INDIUM DE TYPES N ET P

présenté par: LEFEBVRE Gilbert

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. YELON Arthur, Ph.D., président

M. MACIEJKO Romain, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. MASUT Remo, Ph.D., membre

Résumé

Différentes structures métalliques ont été fabriquées sur des substrats dopés n- et p-InP dans le but de réaliser des contacts ohmiques. Des contacts ohmiques Au/AuGe/n-InP, réalisés par effet Joule, ont tous résulté en des valeurs de r_c inférieures à 10^{-5} Ω-cm^2. La plus faible valeur de r_c ($1{,}0 \cdot 10^{-6}$ Ω-cm^2) a été obtenue pour un contact allié recuit à 370 °C durant deux minutes. On privilégie, toutefois, la formation du contact fritté recuit à 350 °C durant quinze secondes. Ce contact engendre une résistivité à peine deux fois plus élevée, ce qui n'est pas significatif devant la valeur de la résistance du contact sur p-InP.

Des structures à base de zinc et de titane ont été fabriquées sur p-InP. La réalisation de contacts ohmiques à base de zinc a posé beaucoup de difficultés. Nous avons été en mesure de fabriquer avec ce dopant qu'un seul contact ohmique. Ce contact a été réalisé avec la structure AuZn/p-InP recuite à 400 °C durant deux minutes et a résulté en une résistance spécifique de contact de $2{,}3 \cdot 10^{-4}$ Ω-cm^2. La non-reproductibilité de ce contact est essentiellement due à l'évaporation fractionnée de l'alliage AuZn. En plus du comportement électrique non-linéaire, la mauvaise adhérence du zinc et de l'alliage AuZn sur la surface d'InP représente la difficulté majeure. Il a été montré que la déposition d'une couche d'or sur le substrat d'InP s'avère nécessaire pour avoir une bonne adhésion des contacts. Toutefois, aucunes des structures Au/Zn/Au/p-InP et AuZn/Au/p-InP fabriquées ne se sont avérées ohmiques. Les contacts Au/Pt/Ti/p-InP se sont avérés, eux aussi, non-ohmiques.

Les solutions que nous avons envisagées pour remédier aux problèmes rencontrés sont les suivantes. La première solution consiste à inclure, dans les structures mentionnées plus haut, une couche de nickel qui agirait alors comme une barrière contre la diffusion externe du zinc. L'avenue la plus sérieuse demeure, toutefois, la réalisation de la structure Au/Pt/Ti/p-$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/p-InP.

Abstract

In the purpose of achieving ohmic contacts, different metallic structures have been fabricated on n- and p-InP. Au/AuGe/n-InP ohmic contacts evaporated by Joule effect have all resulted in specific contact resistance values less than 10^{-5} Ω-cm^2. An alloyed contact annealed at 370 °C during two minutes have resulted in the lowest value of r_c ($1{,}0 \cdot 10^{-6}$ Ω-cm^2). We suggest, however, the formation of a sintered contact annealed at 350 °C during 15 seconds which result to a value of $2{,}0 \cdot 10^{-6}$ Ω-cm^2. This increase of resistance contact is not significant compare to the p-type contact.

Zinc and titanium based structures have been investigated on p-InP. We have realized only one ohmic contact sample. The AuZn/p-InP contact annealed at 400 °C during two minutes have resulted in a specific contact resistance of $2{,}3 \cdot 10^{-4}$ Ω-cm^2. But, we have not been able to reproduce this result. The poor adhesion of the zinc rich alloy surface layer is the main reason. In this regard, we have found that the deposition of a gold layer on the substrate is necessary to promote the adhesion of zinc based metal contacts. However, the Au/Zn/Au/p-InP and AuZn/Au/p-InP structures showed no ohmic behavior. The Au/Pt/Ti/p-InP contacts were also non-linear.

We propose some solutions to remedy to the problems that we have encountered in making those contacts. The first solution is to include a nickel layer in the zinc structures. The aim of the nickel layer is to prevent the out-diffusion of zinc during the thermal processing. The most promising approch remains, however, the fabrication of the Au/Pt/Ti/p-$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/p-InP structure.

Table des matières

Résumé iv
Abstract v
Table des matières vi
Liste des figures ix
Liste des tableaux xi
Liste des symboles xii
Liste des annexes xv
Introduction 1

CHAPITRE 1 - Théorie de la jonction métal/semiconducteur 3

1.1 Introduction 3
1.2 Définition du contact ohmique 3
1.3 Modèles physiques de la jonction métal/semiconducteur 5
1.3.1 Modèle de Schottky 5
1.3.2 Modèle de Bardeen 7
1.3.3 Modèle de Cowley et Sze 8
1.3.4 Autres modèles proposés 10
1.3.5 Ancrage du niveau de Fermi : mécanismes proposés 12
1.4 Mécanismes et modes de transport à la jonction ohmique 13
1.4.1 Conduction par émission thermoionique 14
1.4.2 Diminution de la largeur de barrière et conduction par effet de champ . 15
1.4.3 Réalisation d'une jonction amorphe graduelle et conduction par saut .. 17
1.4.4 Formation de microphases et conduction par îlots 19
1.4.5 Recombinaison des porteurs 21
1.5 Analyse et conclusion 21

CHAPITRE 2 - Technologie et procédés de fabrication des contacts ohmiques 23

2.1 Introduction 23
2.2 Approches de réalisation 23
2.2.1 Position du problème 23
2.2.2 Types de contacts ohmiques 25
2.2.3 Contacts alliés 26
2.2.4 Contacts frittés 27
2.2.5 Contacts avec hétérojonction 27
2.2.6 Design de la structure métallique 28
2.3 Techniques et procédés de fabrication 28
2.3.1 Formation d'une région surfaciale fortement dopée 29
2.3.2 Préparation de la surface 29
2.3.3 Formation du masque 30
2.3.4 Déposition métallique 31
2.3.5 Recuit 32
2.4 Caractérisation électrique 33
2.4.1 Méthodes de caractérisation pour contacts horizontaux 34
2.4.1.1 Méthode d'extrapolation avec espacements variables 35
2.4.1.2 Méthode des trois contacts 38
2.4.2 Méthodes de caractérisation pour substrats entièrement dopés 39
2.4.2.1 Méthode des quatre pointes 39
2.4.2.2 Méthode de Cox et Strack 41
2.4.3 Autres méthodes de caractérisation 41

CHAPITRE 3 - L'art du contact ohmique sur InP 42

3.1 Introduction 42
3.2 Propriétés du phosphure d'indium 42
3.3 Nettoyage de la surface de l'InP 44
3.4 Systèmes métal/InP 45
3.4.1 Introduction 45
3.4.2 Systèmes métal/n-InP 47
3.4.2.1 Contacts à base de germanium 47

3.4.2.2 Contacts à base de titane 48
3.4.2.3 Contacts à base d'étain 49
3.4.3 Systèmes métal/p-InP 49
3.4.3.1 Contacts à base de zinc 49
3.4.3.2 Contacts à base de béryllium 51

CHAPITRE 4 - Expérimentation 52

4.1 Introduction 52
4.2 Choix des matériaux, techniques et procédés 52
4.2.1 Choix des matériaux 52
4.2.2 Choix et description des techniques employées 53
4.2.3 Descriptions des procédures expérimentales 58
4.3 Choix des méthodes de caractérisation électrique 60
4.3.1 Description du montage de mesure 60
4.3.2 Calcul de r_c et Δr_c 61
4.3.2.1 Substrat de type n 62
4.3.2.2 Substrat de type p 62
4.4 Démarche expérimentale 63
4.5 Résultats expérimentaux sur n-InP 64
4.6 Résultats expérimentaux sur p-InP 68
4.6.1 Structures Au/Zn/p-InP et Au/Zn/Au/p-InP 68
4.6.2 Structures AuZn/p-InP et AuZn/Au/p-InP 71
4.6.3 Structure Au/Pt/Ti/p-InP 77
4.7 Discussion 78

Conclusion 82
Références 84
Annexes 91

Liste des figures

1.1 Contacts de types horizontal et vertical. 4
1.2 Diagrammes de bandes d'énergie de la jonction rectificatrice métal/semiconducteur (type n) selon le modèle de Schottky. 6
1.3 Ensemble des quatre diagrammes de bandes d'énergie possibles selon le modèle de Schottky. 7
1.4 Diagramme de bandes d'énergie de la jonction métal/semiconducteur (type n) dans le cas général selon le modèle de Cowley et Sze. 10
1.5 Mécanismes de transport possibles à une jonction métal/semiconducteur abrupte. 16
1.6 Contacts avec zones amorphes. 17
1.7 Contacts avec hétérojonctions. 18
1.8 Jonction métal/semiconducteur selon le modèle de Braslau. 19

2.1 Méthode d'extrapolation avec espacements variables. 36
2.2 Graphique de R_t en fonction de x_j. 37
2.3 Méthode des trois contacts. 38
2.4 Technique des contacts allongés. 39
2.5 Méthode des quatre pointes. 39

4.1 Topographies des surfaces n- et p-InP. 55
4.2 Four à recuit avec tube de quartz et lampe infrarouge. 57
4.3 Courbe I-V relative au contact Au/AuGe/n-InP recuit à 370 °C durant deux minutes. 66
4.4 Photographies des contacts Au/AuGe/n-InP. 67
4.5 Courbes I-V relatives aux contacts Au/Zn/Au/p-InP. 69
4.6 Photographies des contacts Au/Zn/Au/p-InP. 70
4.7 Courbes I-V relatives aux contacts AuZn/p-InP et AuZn/Au/p-InP. 72
4.8 Comparaison des courbes I-V relatives aux contacts AuZn/Au/p-InP en fonction de la solution d'attaque employée. 74
4.9 Photographies des contacts AuZn/p-InP. 75

4.10 Photographies des contacts AuZn/Au/p-InP. 76
4.11 Courbes I-V relatives aux contacts Au/Pt/Ti/p-InP. 77

A.1 Circuit équivalent du contact de type horizontal selon le modèle de la ligne de transmission. 91
A.2 Schéma des plans principaux. 93

B.1 Circuit électrique équivalent d'une diode laser. 95

D.1 Courbes des recuits à 350 °C. 104
D.2 Courbes des recuits à 370 °C. 105
D.3 Courbe du recuit à 380 °C. 106
D.4 Courbe du recuit à 400 °C. 107
D.5 Courbe du recuit à 420 °C. 108
D.6 Courbe du recuit à 450 °C. 109

Liste des tableaux

4.1 Résultats expérimentaux obtenus avec la structure Au/AuGe/n-InP. 65
4.2 Résultats expérimentaux obtenus avec les structures Au/Zn/p-InP et Au/Zn/Au/p-InP. 68
4.3 Résultats expérimentaux obtenus avec la structure AuZn/p-InP. 71
4.4 Résultats expérimentaux obtenus avec la structure AuZn/Au/p-InP. 73
4.5 Résultats expérimentaux obtenus avec la structure Au/Pt/Ti/p-InP. 78

Liste des symboles

a = Distance entre les îlots conducteurs (μm).
d = Longueur des contacts rectangulaires (μm).
d_j = Distance entre les contacts rectangulaires (μm).
f = Facteur d'accroissement du champ électrique.
h = Constante de Planck (eV·s).
k = Constante de Boltzmann ($eV \cdot K^{-1}$).
m = Pente du graphe R_t en fonction de x_j ($\Omega \cdot \mu m^{-1}$).
m^* = Masse effective de l'électron (kg).
q = Charge électrique (Coulomb).
r = Rayon des îlots conducteurs (μm).
r_c = Résistance spécifique de contact ($\Omega \cdot cm^2$).
r_c' = Résistance spécifique de contact régulière ($\Omega \cdot cm^2$).
s = Distance entre les plots circulaires (μm).
t = Epaisseur du substrat (μm).
x_j = Distance entre les plots rectangulaires (μm).
y = Facteur relié à la condition d'applicabilité de la méthode des quatre pointes.

A = Surface des plots circulaires (cm^2).
A^* = Coefficient effectif de Richardson ($A \cdot cm^{-2} \cdot K^{-2}$).
E_C = Energie inférieure de la bande de conduction (eV).
E^a_C = Energie inférieure de la bande de conduction de la zone amorphe (eV).
E^a_V = Energie inférieure de la bande de valence de la zone amorphe (eV).
E_F = Niveau de Fermi (eV).
E_{Fm} = Niveau de Fermi du métal (eV).
E_{Fsc} = Niveau de Fermi du semiconducteur (eV).
E_g = Largeur de la bande interdite (eV).
E_{oo} = Paramètre énergétique relatif à l'effet tunnel (eV).
E_{sc} = Champ électrique dans le semiconducteur ($V \cdot cm^{-1}$).
E_V = Energie supérieure de la bande de valence (eV).

F_{sc} = Pseudo-niveau de Fermi du semiconducteur (eV).
G_λ = Conductance linéique ($\Omega^{-1}\cdot cm^{-1}$).
I = Courant (A).
I_s = Courant de saturation du laser (A).
J = Densité de courant ($A\cdot cm^{-2}$).
J_s = Densité de courant de saturation ($A\cdot cm^{-2}$).
L_t = Longueur de transfert (μm).
N_a = Concentration d'accepteurs ($atomes\cdot cm^{-3}$).
N_d = Concentration de donneurs ($atomes\cdot cm^{-3}$).
Q_d = Charge présente à l'intérieur du semiconducteur (Coulomb).
Q_m = Charge présente sur la surface du métal (Coulomb).
Q_{ss} = Charge présente sur les états de surface (Coulomb).
R = Résistance du laser (Ω).
R_c = Résistance de contact (Ω).
R_e = Résistance de transfert (Ω).
R_o = Résistance résiduelle (Ω).
R_p = Résistance shunt du laser (Ω).
R_s = Coefficient de résistivité ($\Omega\cdot\mu m^{-1}$).
R_{sh} = Résistance carrée de la couche semiconductrice (Ω).
R_{sk} = Résistance carrée de la couche interfaciale (Ω).
R_{sp} = Résistance d'étalement (Ω).
R_t = Résistance totale (Ω).
R_λ = Résistance linéique ($\Omega\cdot cm^{-1}$).
S = $d\phi_{bn}/d\chi_m$.
T = Température (K).
V = Tension électrique appliquée par rapport au semiconducteur (Volt).
V_d = Potentiel de diffusion (eV).
W = Largeur des contacts rectangulaires (μm).
Z_o = Impédance caractéristique de la ligne de transmission (Ω).

α = Coefficient d'atténuation (μm^{-1}).
χ_m = Electronégativité du métal.
χ_{sc} = Affinité électronique du semiconducteur (eV).

δ = Epaisseur de la couche interfaciale (cm).

ε_s = Permittivité du semiconducteur ($F \cdot cm^{-1}$).

λ = Libre parcours moyen des porteurs électroniques (nm).

ϕ = Diamètre des plots circulaires (μm).

ϕ_b = Hauteur de la barrière de potentiel à la jonction métal/semiconducteur (eV).

ϕ_{bn} = Hauteur de la barrière de potentiel à la jonction métal/semiconducteur de type n (eV).

ϕ_{bo} = Hauteur de la barrière de potentiel sans la présence d'effets réducteurs (eV).

ϕ_{bp} = Hauteur de la barrière de potentiel à la jonction métal/semiconducteur de type p (eV).

ϕ_{eff} = Hauteur de la barrière effective (eV).

ϕ_o = Niveau neutre relatif aux états de surface (eV).

γ = Facteur de poids.

η = Paramètre exponentiel de la diode.

μ = Mobilité électronique ($cm^2 \cdot s^{-1} \cdot V^{-1}$).

ρ = Résistivité du substrat ($\Omega \cdot cm$).

ρ_c = Résistivité de la couche semiconductrice ($\Omega \cdot cm$).

ω = Fréquence de modulation ($rad \cdot s^{-1}$).

ξ_{sc} = Différence entre le niveau inférieur de la bande de conduction et le niveau de Fermi (eV).

Δr_c = Incertitude sur r_c (Ω).

$\Delta\phi_i$ = Diminution de la barrière due à l'effet de la force image (eV).

Φ_m = Travail de sortie du métal par rapport au vide (eV).

Φ_{sc} = Travail de sortie du semiconducteur par rapport au vide (eV).

Liste des annexes

Annexe A - Modèle de la ligne de transmission (TLM) 91
Annexe B - Méthode de Barnes et Paoli 95
Annexe C - Résultats publiés dans la littérature 98
Annexe D - Courbes de recuit 104

Introduction

La fabrication des dispositifs électroniques et optoélectroniques réalisés à partir de composés III-V requiert la réalisation de contacts ohmiques fiables et reproductibles. Cependant, la fabrication de contacts ohmiques sur les composés III-V pose certains problèmes que l'on ne retrouve pas lors de la fabrication des contacts sur les semiconducteurs élémentaires comme le silicium et le germanium. Ces problèmes sont en grande partie dûs aux interactions métallurgiques qui ont lieu lors des traitements thermiques. Il en résulte ainsi des problèmes de reproductibilité et de stabilité chimique. La nécessité d'obtenir des contacts ohmiques de bonne qualité sur les semiconducteurs III-V enclencha, au début des années 80, le début de nouvelles recherches destinées à approfondir les connaissances dans ce domaine.

Le phosphure d'indium est un semiconducteur III-V qui entre dans la fabrication de plusieurs dispositifs (laser, diode électroluminescente, transistor à effet de champ). La fabrication des contacts ohmiques sur le phosphure d'indium de type p s'avère beaucoup plus difficile que dans le cas du substrat de type n. Cela est essentiellement dû à la hauteur de la barrière relativement élevée (ϕ_{bp} = 0,85 eV) que présente l'interface métal/p-InP au transport des trous. Il en résulte que les contacts ohmiques sur p-InP sont près de deux ordres de grandeur plus résistifs que les contacts fabriqués sur n-InP. Dans le cas d'une diode laser, ils déterminent en majeure partie la résistance du laser.

L'objectif de ce projet de maîtrise consistait à établir une procédure expérimentale simple permettant de réaliser des contacts ohmiques sur le phosphure d'indium de types n et p. Ce travail a été réalisé au laboratoire d'optoélectronique dans le cadre d'un projet visant à fabriquer un laser InGaAsP/InP. Les contacts ohmiques réalisés devaient présenter les qualités nécessaires pour assurer le fonctionnement adéquat d'un laser Entres autres qualités, les contacts formés devaient présenter de faibles résistances spécifiques de contact.

On définit le contact ohmique comme étant une jonction métal/semiconducteur présentant un comportement électrique linéaire. Le contact ohmique est caractérisé quantitativement par la résistance spécifique de contact r_c que l'on exprime en Ω-cm^2. L'étude présente consiste principalement à étudier la caractéristique r_c en fonction des paramètres principaux que sont la température et la durée de recuit, la nature et

l'épaisseur des couches déposées, le taux de déposition et les solutions d'attaque chimique. Parmi les techniques utilisées, il y a notamment l'évaporation par effet Joule, l'évaporation par faisceau électronique et le recuit effectué au moyen d'une plaque de graphite chauffée par une lampe infrarouge sous atmosphère réductrice. La caractéristique r_c est déterminée au moyen de la méthode des quatre pointes. La microscopie optique est également utilisée pour caractériser la surface des contacts.

Le mémoire est divisé en quatre chapitres. Le premier chapitre traite de la théorie se rapportant à la jonction métal/semiconducteur. On y discute principalement des modèles qui ont été avancés pour expliquer l'origine de la barrière de potentiel qui s'établit à la jonction métal/semiconducteur, et des mécanismes de conduction qui peuvent être présents à l'interface.

Le second chapitre est une revue de la technologie de fabrication des contacts ohmiques. Il y est, entre autre, question de la problématique technologique de même que des méthodes de caractérisation électrique qui sont les plus souvent employées.

On présente, dans le troisième chapitre, l'art actuel du contact ohmique sur le phosphure d'indium. Une revue des principales expériences publiées est donnée.

Le quatrième chapitre traite de la partie expérimentale du projet. On y décrit les montages utilisés de même que les procédures expérimentales élaborées. On présente, ensuite, les résultats de nos expériences de même qu'une analyse des résultats. Une discussion sur l'ensemble des résultats obtenus clos le chapitre.

Les courbes des recuits que nous avons effectué sont données en annexe. On donne également, en annexe, un sommaire des résultats que l'on retrouve dans la littérature de même que les développements analytiques de deux méthodes de caractérisation électrique, soient les méthodes de la ligne de transmission et de Barnes et Paoli.

CHAPITRE 1

Théorie de la jonction métal/semiconducteur

1.1 Introduction

La jonction métal/semiconducteur peut présenter deux types de comportement électrique : rectificateur ou ohmique. Dans la très grande majorité des cas, la formation d'un contact métal/semiconducteur se traduit par une caractéristique I-V non-linéaire. La présence d'une barrière de potentiel à l'interface en est la cause fondamentale. Cette caractéristique naturelle de rectification des contacts métal/semiconducteur a été mise à profit au début du siècle lorsque Braun et Marconi ont conçu des contacts redresseurs à point de contact ("*cat-whisker*") servant à la détection des signaux radio-électriques. Les contacts redresseurs trouvaient alors une application industrielle majeure. C'est en raison de cette application importante que l'étude de la jonction métal/semiconducteur est liée historiquement à l'analyse des contacts redresseurs.

Ce chapitre se subdivise en deux parties. On décrit dans la première partie du chapitre les divers modèles qui ont été élaborés dans le but d'expliquer la formation de la barrière de potentiel à la jonction. Vient ensuite l'étude proprement dite de la jonction ohmique. Cette étude traite principalement des approches théoriques de la réalisation de même que des modes et mécanismes de transport de charge en présence du contact ohmique. Puisque ces deux aspects sont étroitement liés, on les traite simultanément et ne font l'objet que d'une seule section. Les modèles présentés tant au niveau de la formation de la barrière que des modes de transport peuvent être classés dans deux groupes, suivant que l'on considère la jonction comme abrupte ou non. Nous allons débuter cette revue théorique par la définition du contact ohmique.

1.2 Définition du contact ohmique

Le contact ohmique idéal est un contact non-injecteur de faible résistance, caractérisé par une relation courant-tension linéaire, indépendante de la polarité de la tension

appliquée. En pratique, un contact est considéré ohmique si la chute de tension à ses bornes est beaucoup plus faible que la chute de tension à travers le dispositif. La linéarité de la courbe J-V est moins importante que le rapport des chutes de tension. On caractérise le contact ohmique par sa résistance spécifique de contact r_c que l'on exprime en Ω-cm^2 et qui est donnée par l'expression 1.1 :

$$r_c = (dJ/dV)^{-1} \mid_{V=0} \qquad [\Omega\text{-cm}^2] \qquad (1.1)$$

La notion de résistance de contact vient du fait que l'application d'une tension à la jonction est nécessaire pour qu'il y ait présence d'un courant. Un bon contact ohmique doit avoir une résistance spécifique de contact de l'ordre de 10^{-5} Ω-cm^2. Il doit de plus présenter les qualités suivantes;

(1) posséder une microstructure stable du point de vue thermique et électrochimique;
(2) la couche métallique doit posséder une bonne adhésion au substrat et être exempte de contrainte;
(3) être reproductible et facile à souder;
(4) posséder une conductivité thermique élevée.

Du point de vue géométrique, il existe deux types de contact : le type vertical et le type horizontal. Dans le cas du contact de type vertical illustré à la figure 1.1b, les lignes de courant ont une direction perpendiculaire à la surface du contact alors que les contacts de type horizontal donnent lieu à un flux de courant parallèle à la surface du substrat.

(a) contact horizontal (b) contact vertical

Figure 1.1 Contacts de types horizontal et vertical.

Pour ce dernier type de contact, il y a un resserrement des lignes de courant ("*current crowding*") sous le contact alors que dans le cas du contact de type vertical, il y étalement des lignes de courant ("*current spreading*"). Chacun de ces effets mène à un

accroissement de la résistance totale du dispositif.

1.3 Modèles physiques de la jonction métal/semiconducteur

1.3.1 Modèle de Schottky

Schottky tenta, en 1938, d'expliquer le comportement électrique de la jonction métal/semiconducteur au moyen des diagrammes de bandes d'énergie. On illustre à la figure 1.2, les diagrammes de bandes d'énergie du système métal/semiconducteur dans les cas respectifs où les deux matériaux sont isolés et réunis pour le contact rectificateur de type n avec $\Phi_m > \Phi_{sc}$. Φ_m et Φ_{sc} sont respectivement les travaux de sortie des électrons du métal et du semiconducteur. Le travail de sortie est l'énergie nécessaire qu'il faut transférer à l'électron situé au niveau de Fermi pour qu'il atteigne le niveau d'énergie libre, alors que l'affinité électronique χ_{sc} représente l'énergie nécessaire pour extraire un électron situé au bas de la bande de conduction du semiconducteur et l'amener au niveau d'énergie libre.

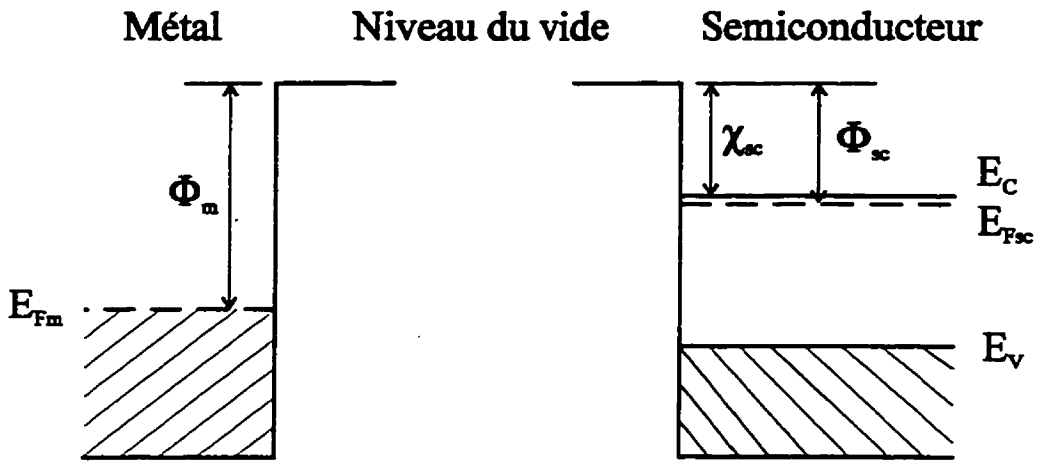
Le mécanisme de formation de la barrière est le suivant. Si on joint les deux matériaux, la condition d'équilibre thermodynamique entre le métal et le semiconducteur impose l'égalité des niveaux de Fermi. Il y a donc transfert d'électrons du semiconducteur vers le métal où il s'établit une couche surfaciale négative. Il se crée ainsi, une région uniforme de charge d'espace positive dans le semiconducteur, près de l'interface. Le champ électrostatique résultant s'oppose donc au transfert d'électrons : il y a création d'une barrière de potentiel parabolique, dite barrière de Schottky. On définit la hauteur de la barrière comme étant celle que les électrons situés dans le métal doivent traverser. Contrairement à la barrière que les électrons présents dans le semiconducteur doivent franchir, cette hauteur de barrière est indépendante de la tension appliquée.

La hauteur de la barrière de potentiel est donnée respectivement pour les cas des semiconducteurs de type n et p par les expressions :

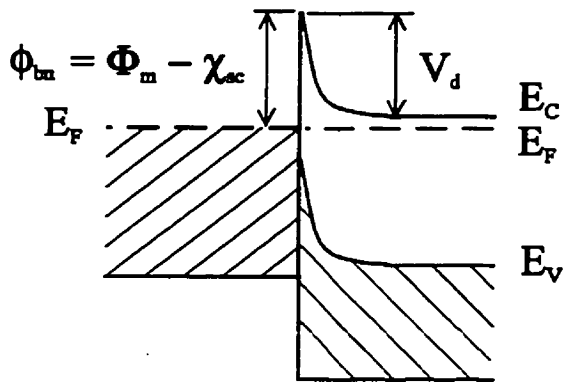
$$\phi_{bn} = \Phi_m - \chi_{sc} \qquad (1.2)$$

et $$\phi_{bp} = E_g - (\Phi_m - \chi_{sc}) \qquad (1.3)$$

où $$E_g = \phi_{bn} + \phi_{bp} \qquad (1.4).$$



(a) Métal et semiconducteur séparés



(b) Métal et semiconducteur réunis

Figure 1.2 Diagrammes de bandes d'énergie de la jonction rectificatrice métal/ semiconducteur (type n) selon le modèle de Schottky.

L'expression 1.2 est dite limite de Schottky. Si la valeur de la barrière est négative, le contact est ohmique. Dans le cas contraire, il est redresseur. On montre à la figure 1.3 les quatre diagrammes de bandes d'énergie que l'on peut obtenir avec le modèle de Schottky. Il faut prendre note que le modèle de Schottky suppose un contact parfait entre le métal et le semiconducteur, i.e. l'absence de toute couche interfaciale (oxyde). Selon ce modèle,

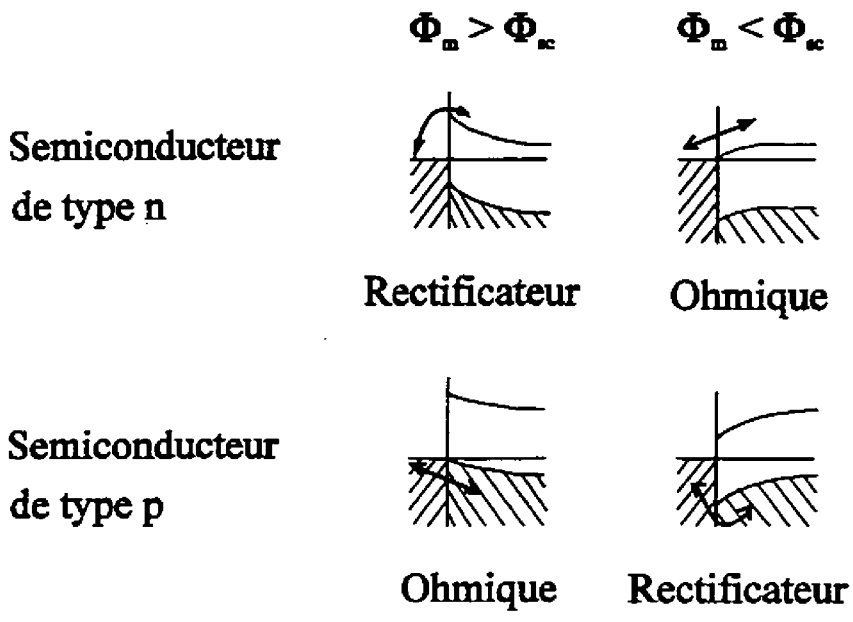


Figure 1.3 Ensemble des quatre diagrammes de bandes d'énergie possibles selon le modèle de Schottky.

le comportement électrique de la jonction est simplement déterminé par les valeurs des travaux de sortie, de l'affinité électronique et de la largeur de la bande interdite. La hauteur de barrière dépend alors uniquement des propriétés volumiques du matériau.

1.3.2 Modèle de Bardeen

Des expériences menées sur différentes structures métal/silicium et métal/germanium ont établi que le comportement électrique de la jonction n'était pas déterminé systématiquement par les valeurs des travaux de sortie. Bardeen suggéra alors, en 1947, l'hypothèse suivante : si un nombre d'états de surface intrinsèques, causés par la fin de périodicité du cristal, était assez élevé, la hauteur de la barrière serait alors indépendante du travail de sortie du métal. La hauteur de la barrière serait ainsi déterminée entièrement par ces états de surface.

On reprendra, pour illustrer le mécanisme de formation de la barrière, le cas du système précédent (semiconducteur de type n avec $\Phi_m > \Phi_{sc}$). En l'absence d'états de surface, la charge sur la surface du métal doit être opposée (négative) et égale à la charge positive due aux donneurs non compensés. En présence d'états de surface, l'équation de

neutralité devient : $Q_m + Q_{ss} + Q_d = 0$ où Q_{ss} est la charge présente sur les états de surface.

Ces états de surface sont occupés ou vides suivant leur position relative par rapport au niveau de Fermi. On définit le niveau neutre ϕ_o comme étant la valeur mesurée à partir du niveau supérieur de la bande de valence pour laquelle les états de surface doivent être remplis pour avoir une neutralité de charge à la surface du semiconducteur. ϕ_o est donc un paramètre énergétique qui caractérise les états de surface.

Les états situés sous ϕ_o sont considérés comme étant des états donneurs (positifs lorsque vides) alors que les états situés au-dessus de ϕ_o sont appelés états accepteurs (négatifs lorsque remplis). Ainsi, si le niveau de Fermi à l'interface ne coincide pas avec le niveau neutre, il y aura la présence d'une charge nette à cette interface. Si par exemple, le niveau neutre ϕ_o se situe au-dessus de E_F, les états de surface contiendront alors une charge positive nette et la charge Q_d devra alors être plus petite que dans le cas où il y aurait absence d'états de surface. Le potentiel de diffusion est donc abaissé de même que la hauteur de la barrière. Il y a donc transfert d'électrons qui a pour effet de pousser ϕ_o vers E_F et ainsi réduire la charge positive sur les états de surface. De façon similaire, ϕ_o serait également poussé vers E_F dans le cas où le niveau neutre se situerait initialement sous le niveau de Fermi. Les états de surface agissent donc comme une boucle de rétroaction négative.

Si la densité des états de surface est très élevée, on a l'approximation $\phi_o \approx E_F$. On dit alors qu'il y ancrage du niveau de Fermi. La hauteur de la barrière est alors donnée par l'expression :

$$\phi_{bn} = E_g - \phi_o \qquad (1.5)$$

qui est connue sous le nom de limite de Bardeen. La hauteur de la barrière est alors dite ancrée par la grande densité d'états de surface et est indépendante du travail de sortie du métal. Cela se produit pour des densités d'états de surface de l'ordre de 10^{12} à 10^{13} cm^{-2} eV^{-1}.

1.3.3 Modèle de Cowley et Sze

Cowley et Sze ont établi en 1965 un modèle plus général ayant pour but de concilier les modèles de Schottky et Bardeen dont les expressions constituent les cas limites

opposés. Leur travail théorique a fait suite aux travaux expérimentaux de Archer et Atalla (1963) et de Mead et Spitzer (1964).

Cowley et Sze ont posé les hypothèses de départ suivantes;

(1) il y a présence d'une couche interfaciale entre le métal et le semiconducteur. Cette couche est transparente aux électrons qui possèdent une énergie supérieure à ϕ_o. Elle peut aussi supporter une différence de potentiel;

(2) la densité d'états de surface est considérée constante sur l'étendue ϕ_o à E_F et est indépendante du métal;

(3) on suppose que la charge Q_d dans le semiconducteur est nulle. On se retrouve donc en régime de bandes plates.(1)

Le diagramme de bandes d'énergie relatif au modèle de Cowley et Sze est illustré à la figure 1.4. Il faut signaler, cependant, que ce diagramme illustre le cas général et non le diagramme relatif au cas des bandes plates. Cowley et Sze ont pu réunir dans une même expression (1.6) les expressions de Schottky et Bardeen en y introduisant le facteur de poids γ qui prend une valeur comprise entre 0 et 1, et qui dépend essentiellement de la densité d'états de surface et de l'épaisseur de la couche interfaciale. Dans le cas où l'on a une grande densité d'états, γ tend vers zéro et l'on se retrouve, à un terme près, avec le cas limite de Bardeen.

$$\phi_{bn} = \gamma (\Phi_m - \chi_{sc}) + (1 - \gamma)(E_g - \phi_o) - \Delta\phi_i \qquad (1.6)$$

Le terme $\Delta\phi_i$ témoigne de l'effet de la force image (effet Schottky) sur la hauteur de la barrière. L'inclusion de la force image a pour effet d'abaisser la hauteur de barrière.

L'une des hypothèses de départ suppose qu'il n'existe pas de champ électrique dans le semiconducteur. Dans le cas contraire, cependant, l'effet de la présence du champ électrique $\mathbf{E_{sc}}$ dans le semiconducteur aura pour effet d'abaisser la hauteur de la barrière par une quantité proportionnelle à la valeur maximale du champ. Toutefois, une large densité d'états rend la hauteur de la barrière indépendante du champ électrique. Cet effet réducteur a été introduit par Andrews en 1970. Il y a un troisième effet réducteur qui s'ajoute aux deux précédents. Si les fonctions d'ondes électroniques du métal pénètrent dans le semiconducteur, il y a création d'un dipôle de surface et, par la même occasion,

---

(1) Il semble, selon Rhoderick (1988), que Cowley et Sze n'aient pas été conscients de l'approximation avancée.

un abaissement de ϕ_b. Il faut, pour cela, que l'épaisseur de la couche isolante ne soit pas trop épaisse. Cet effet, dont il sera question à la section 1.3.5, est basé sur le modèle proposé par Heine (1965) pour expliquer l'ancrage du niveau de Fermi.

Bien que le modèle de Cowley et Sze ait été longtemps utilisé, il s'avère cependant trop simpliste parce qu'il assume nécessairement la présence d'une couche interfaciale de

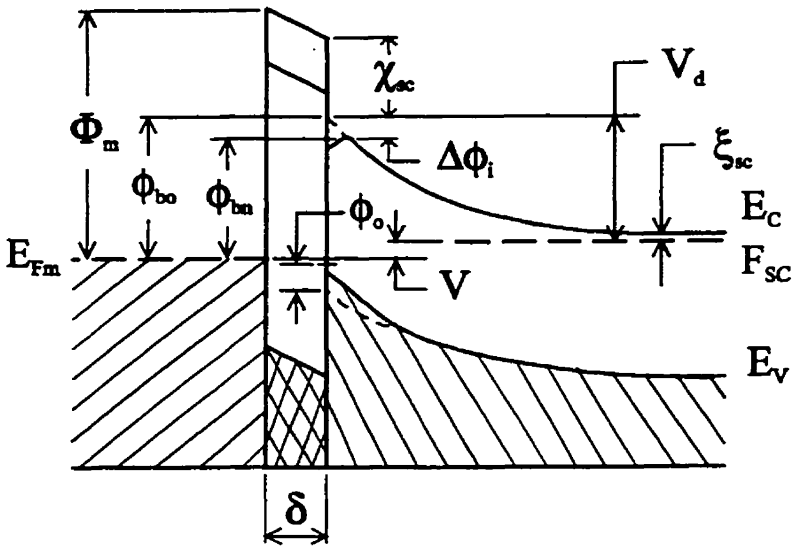


Figure 1.4 Diagramme de bandes d'énergie de la jonction métal/semiconducteur (type n) dans le cas général selon le modèle de Cowley et Sze.

même qu'une distribution énergétique uniforme des états de surface. De plus, il ignore toute modification possible du travail de sortie du métal et du semiconducteur provenant des contributions dipolaires de surface lorsque les matériaux viennent en contact avec la couche isolante.

1.3.4 Autres modèles proposés

Mead et Spitzer (1964) avaient précédemment établi la règle empirique bien connue des deux tiers (ou règle de Mead). Cette règle stipule que la hauteur de barrière sur les semiconducteurs covalents de type n est approximativement égale au deux tiers du gap. Cette règle s'applique dans le cas des composés GaAs, GaP et AlAs mais ne convient pas aux composés InP, InAs et GaSb.

Kurtin et al. (1969) ont, à l'instar de Cowley et Sze, proposé un modèle d'interface linéaire. Ils ont posé que la hauteur de barrière dépendait linéairement de l'électronégativité du métal plutôt que du travail de sortie ϕ_m. Ils ont obtenu l'expression :

$$\phi_{bn} = S\chi_m + C \qquad (1.7)$$

où S est un paramètre sans dimension qui mesure la sensitivité de ϕ_{bn} par rapport au métal ($S = d\phi_{bn}/d\chi_m$) et C, une constante. Ils arrivent à la conclusion que les conducteurs de nature ionique montrent un comportement plus près du contact Schottky idéal et exhibent ainsi, une plus faible densité d'états de surface. Toutefois, ce modèle ne peut s'appliquer de façon générale.

Par la suite, McCaldin et al. (1976) ont repris la règle de Mead pour établir la règle empirique du commun anion ("*common anion rule*"). En utilisant l'or comme métal de référence, ils ont établi que les hauteurs de barrière sur plusieurs semiconducteurs de type p variaient inversement en fonction de l'électronégativité de l'anion du semiconducteur. Ce modèle empirique implique deux choses. Premièrement, les semiconducteurs qui sont constitués d'un même anion doivent exhiber une même hauteur de barrière, et deuxièment, ϕ_{bp} devient une propriété volumique. Cette règle n'a cependant pas réussi à décrire correctement tous les systèmes, notamment ceux qui impliquent les composés ternaires, et devient non valide dans le cas où le métal choisi est réactif (Al). De son côté, Brillson (1978) soutient que la réactivité chimique joue un rôle important dans la détermination de la hauteur de barrière. Il a montré que les semiconducteurs caractérisés par de faibles chaleurs de formation avaient des hauteurs de barrière indépendantes de la nature du métal déposé.

Freeouf et Woodall (1981) ont pris en considération les observations expérimentales qui témoignent des interactions métallurgiques entre les éléments du semiconducteur et de la couche métallique et ont élaboré le modèle du travail de sortie effectif ("*effective work function model*"). Ce modèle suggère que la hauteur de barrière est fixée par la présence de différentes phases qui se présentent sous la forme de petits îlots, et auxquelles, on attribue des travaux de sortie différents. On doit ainsi faire appel à la notion de travail de sortie effectif. En reprenant l'expression de Schottky, ils ont obtenu :

$$\phi_{bn} = \phi_{eff} - \chi_{sc} \qquad (1.8)$$

où ϕ_{eff} représente la moyenne pondérée des travaux de sortie des différentes phases présentes à l'interface. Il semblerait, selon les auteurs, que dans le cas des semiconducteurs III-V, l'anion apporte la contribution la plus importante à ϕ_{eff}. Ce modèle a été en mesure d'expliquer les succès et les échecs du modèle du commun anion. Toutefois, ce modèle requiert nécessairement l'existence à l'interface d'un mélange de différentes phases réparties en petits îlots ("*microclusters*").

Comme on peut le constater, tous les modèles décrits dans cette section font appel à l'aspect chimique. Cela contraste avec les trois premiers modèles décrits précédemment.

1.3.5 Ancrage du niveau de Fermi : mécanismes proposés

On traite dans cette section des modèles qui ont été proposés pour expliquer les mécanismes responsables de l'ancrage du niveau de Fermi. Il s'agit des modèles de Heine (1965) et Spicer et al. (1979).

Heine (1965) a tenté d'expliquer l'ancrage du niveau de Fermi au moyen de la pénétration des fonctions d'onde électroniques du métal à l'intérieur de la bande interdite du semiconducteur. Cette pénétration engendrerait la formation d'états induits situés dans la bande interdite ("*metal induced gap states*" - MIGS). Il avait posé comme hypothèse de départ que les surfaces clivées sous un vide élevé ne pouvaient comporter de défauts de surface en nombre assez élevé pouvant mener à un ancrage. Ce modèle tient donc compte de l'influence du métal sur la surface du semiconducteur. Le métal change la forme du potentiel et la charge associée aux liens pendants. La pénétration des fonctions d'onde dans le semiconducteur crée en plus un abaissement de la barrière de potentiel.

Spicer et al. (1979) ont proposé un modèle ("*unified defect model*") qui stipule que les hauteurs de barrière sont déterminées par les défauts créés à l'interface lors de l'adsorption d'éléments à la surface du semiconducteur. Le niveau énergétique des états ne dépendrait pas de la nature du métal déposé mais serait plutôt lié au type de défaut créé (vacance, anion sur un site cation, etc...). Ils ont trouvé expérimentalement que la déposition de moins d'une monocouche d'atomes métalliques (ou d'oxygène) suffisait à créer un nombre important de défauts à la surface qui conduisait à l'ancrage du niveau de Fermi. Le mécanisme de formation des défauts repose essentiellement sur la création de sites vacants causés par la condensation des atomes déposés sur la surface. L'énergie libérée qui résulte de la condensation extrait les atomes hors de leur site. Les états de

surface de type accepteur sont identifiés avec les sites anions vacants alors que les états donneurs sont identifiés avec les sites cations vacants. Plusieurs travaux théoriques et expérimentaux dont ceux de Daw et Smith (1980) et Palau et al. (1985) ont validé le bien-fondé de ce modèle.

1.4 Mécanismes et modes de transport à la jonction ohmique

La jonction métal/semiconducteur est un dispositif unipolaire. Le courant est principalement dû au transport des porteurs majoritaires. S'il a été clairement établi que le processus d'émission thermoionique était le mécanisme de transport prédominant dans les contacts Schottky, il n'a pas été possible d'identifier un mécanisme unique responsable du comportement linéaire des jonctions ohmiques. La difficulté liée à l'étude du transport des porteurs à la jonction ohmique est essentiellement due à la complexité reliée à l'inhomogénéité de l'interface découlant des interactions métallurgiques.

Les contacts ohmiques subissent des traitements thermiques qui ont principalement pour but de créer une région semiconductrice surdopée près de l'interface. Il en résulte alors, dans la plupart des cas, la formation d'une interface très tourmentée et non abrupte dont il peut être difficile, voire même impossible, d'établir le diagramme de bande d'énergie correspondant. Le mécanisme de conduction qui prend place dépend de la forme du diagramme de bandes d'énergie ou des propriétés électriques que l'on attribue aux différents composés. Certains ont émis l'hypothèse que le transport des porteurs à la jonction ohmique soit gouverné par plusieurs mécanismes.

On décrit dans les paragraphes qui suivent les principaux mécanismes de conduction qui ont été proposés pour expliquer la caractéristique linéaire des contacts ohmiques. On peut regrouper ces mécanismes selon le type de jonction que l'on attribue au contact ohmique, soit abrupte ou non-abrupte. Contrairement aux modèles classiques, les modèles qui ont suivi ont pris en considération la nature chimique et métallurgique de l'interface.

On dénombre principalement trois approches théoriques pour réaliser un contact ohmique. Ce sont par ordre d'importance;

(1) la diminution de la largeur de barrière;
(2) la diminution de la hauteur de barrière;
(3) la formation d'une jonction graduelle.

On attribue, dans la très grande majorité des cas, la formation des jonctions ohmiques à une diminution de la largeur de barrière qui permet la conduction par effet tunnel.

1.4.1 Conduction par émission thermoionique

Dans leurs travaux sur la théorie de la diffusion, Wagner de même que Schottky et Spenke ont considéré que les mécanismes de diffusion et d'entraînement étaient les processus limitatifs au transport des charges. La théorie de la diffusion se base sur l'hypothèse qui pose que le parcours moyen λ est beaucoup plus petit que la largeur de la zone d'appauvrissement. Cette théorie a pu expliquer le comportement rectificateur de la jonction mais n'a pas été en mesure d'interpréter correctement la dépendance en température de J(V).

Bethe (1942) a émis l'hypothèse que si le parcours moyen est plus grand que la distance entre le haut de la barrière et la position pour laquelle le bas de la bande de conduction est réduite de la grandeur kT, l'émission thermoionique devient le mécanisme qui offre le plus d'opposition au passage du courant. L'émission thermoionique consiste en l'émission de porteurs ayant acquis thermiquement assez d'énergie pour passer au-dessus de la barrière de potentiel. La diffusion et l'entraînement des porteurs dans cette région deviennent alors négligeables et le pseudo-niveau de Fermi dans le semiconducteur est constant. La relation densité de courant-tension est donnée par l'expression :

$$J = J_S (\exp(qV/kT) - 1) \qquad (1.9)$$

avec $J_S = A^* T^2 \exp(-q\phi_b/kT)$ où A^* est le coefficient effectif de Richardson pour une jonction Schottky idéale; V, la tension appliquée mesurée positivement par rapport au semiconducteur et ϕ_b, la hauteur de la barrière de potentiel.

A l'équilibre thermodynamique, la densité de courant est nulle en raison des deux courants égaux qui se déplacent en sens opposés. Lorsqu'on applique une tension V positive, la différence de potentiel (d.d.p.) électrostatique à travers toute la barrière est réduite, d'où une augmentation de courant. Finalement, dans le cas où la tension appliquée est négative, il y a un accroissement de la d.d.p. électrostatique. Seul un courant de saturation est alors présent.

Si on applique la relation 1.1 à l'expression 1.9, on obtient l'expression de la résistance

spécifique pour le mode TE ("*thermionic emission*") :

$$r_c = k \exp(q\phi_b/kT)/qA^*T \qquad (1.10)$$

La résistance spécifique de contact est donc indépendante du dopage et dépend de la hauteur de la barrière et de la température.

Il existe très peu de contacts qui présentent une hauteur de barrière suffisamment faible pouvant permettre un comportement ohmique. Le cas du semiconducteur InAs de type n représente un cas particulier du fait qu'il présente une hauteur de barrière négative. Cette barrière négative est causée par un ancrage du niveau de Fermi dans la bande de conduction. Mais certains, comme Freeouf et Woodall (1981), de même que Clausen et Leistiko (1993), associent, pour certains types de contacts, le transport à la jonction ohmique au mode d'émission thermoionique. Cela est rendu possible, selon eux, par la formation de composés chimiques auxquels on attribue une valeur de travail effective moindre que le travail de sortie du métal déposé.

1.4.2 Diminution de la largeur de barrière et conduction par effet de champ

Le premier mécanisme qui a été proposé (Padovani et Stratton, 1966) pour expliquer le mode de conduction qui prévaut à la jonction ohmique est celui du transport des porteurs de charge par effet de champ ("*field emission*" - FE) à travers la barrière de potentiel. Le mode de conduction par effet de champ (ou effet tunnel) est l'un des trois modes qui s'inscrit dans le cadre de la théorie analytique de la jonction abrupte. Les deux autres modes sont l'émission thermoionique et l'émission thermoionique assistée par effet de champ ("*thermionic field emission*" - TFE), ce dernier mode étant un mode transitif entre le comportement ohmique et le comportement rectificateur. On illustre à la figure 1.5, les différents mécanismes de transport possibles à une jonction métal/semiconducteur abrupte. Les mécanismes 1 et 2 correspondent respectivement à l'émission thermoionique et à la conduction par effet de champ. Le mécanisme 3 représente la recombinaison des porteurs.

Le mode de conduction par effet de champ devient le mode de transport prédominant à la jonction lorsqu'on réussit à diminuer la largeur de barrière en dopant fortement la

région semiconductrice près de l'interface. L'épaisseur de la région dégénérée qui est créée doit être plus grande que la zone d'appauvrissement de la barrière. La largeur de la barrière décroît proportionnellement en fonction de la racine de la concentration du dopage. La conduction par effet tunnel a principalement lieu au pseudo-niveau de Fermi

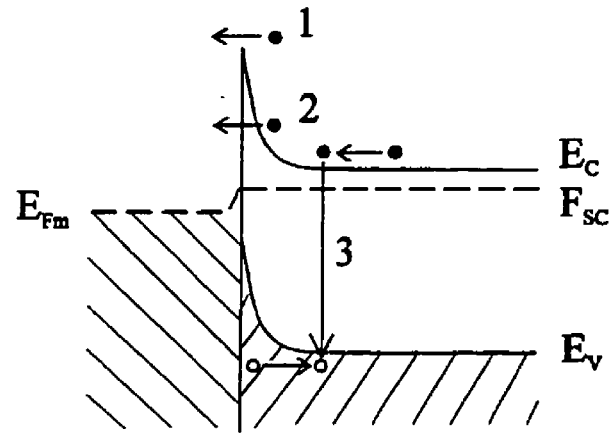


Figure 1.5 Mécanismes de transport possibles à une jonction métal/semiconducteur abrupte.

du semiconducteur. La probabilité de passage est indépendante du sens de déplacement des porteurs. C'est la raison pour laquelle la caractéristique J(V) est linéaire et symétrique par rapport à l'origine. Contrairement aux deux autres modes, le mode FE ne dépend pas de la température. La résistance spécifique de contact est alors déterminée principalement par le terme :

$$r_c \propto (1/E_{oo}) \exp(q\phi_b/E_{oo}) \qquad (1.11)$$

où $E_{oo} = qh\,(N_d/m^*\varepsilon_s)^{1/2}/4\pi$ représente un paramètre relatif à l'effet tunnel. C'est la valeur d'énergie mesurée à partir du haut de la barrière pour laquelle la probabilité de transmission est égale à 1/e. En théorie, le logarithme de r_c varie linéairement en fonction de $N_d^{-1/2}$ dans le cas des forts dopages.

Si on diminue la concentration de dopage pour une même hauteur de barrière, l'émission thermoionique assistée par effet de champ devient le mode de conduction dominant. Ce mode de conduction consiste au passage des porteurs thermiquement excités à des niveaux d'énergie situés entre le haut de la barrière et le pseudo-niveau de

Fermi du semiconducteur ou au niveau de Fermi du métal (dépendamment de la polarisation de la tension appliquée) à travers la barrière par effet tunnel. La résistance spécifique de contact est proportionnelle au facteur :

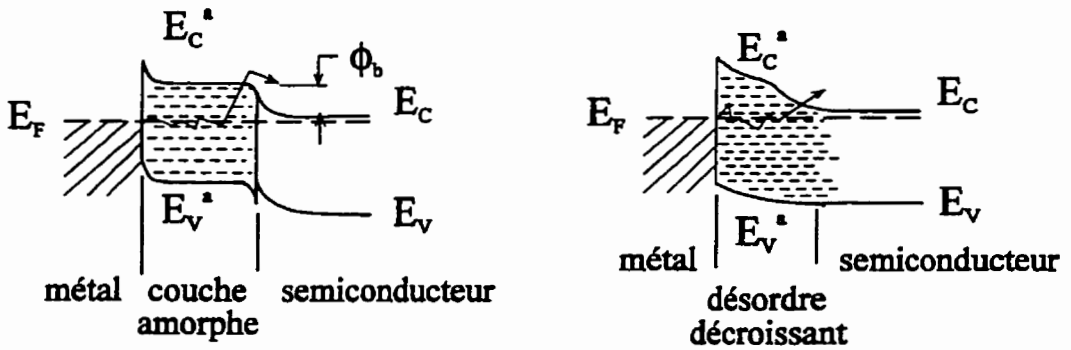
$$r_c \propto \exp(q\phi_b/(E_{oo}\coth(E_{oo}/kT))) \qquad (1.12)$$

Le mode TFE est donc fonction de la température et de la concentration de porteurs.

1.4.3 Réalisation d'une jonction amorphe graduelle et conduction par saut

Partant du fait que le comportement de plusieurs contacts ohmiques ne pouvait être expliquer au moyen des mécanismes de transport déjà existant (effet de champ et émission thermoionique), Sebeysten (1982) a proposé un modèle qui repose sur l'existence d'une jonction graduelle. On entend par jonction graduelle, une variation lente de la bande considérée du diagramme d'énergie de la région comprise entre la couche métallique et la région semiconductrice cristalline.

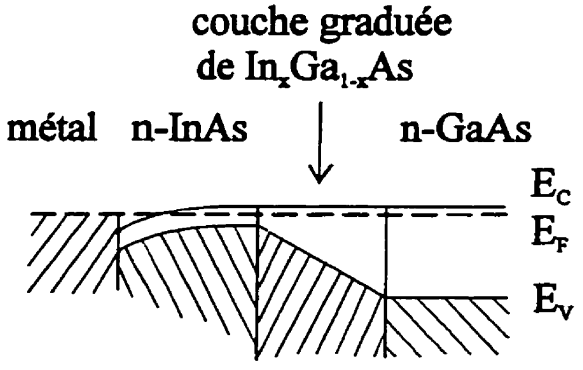
On peut réaliser une jonction graduelle selon deux approches. La première consiste à créer une région amorphe graduelle en perturbant fortement la région cristalline du semiconducteur à contacter. Si la transition entre la zone amorphe et la zone cristalline



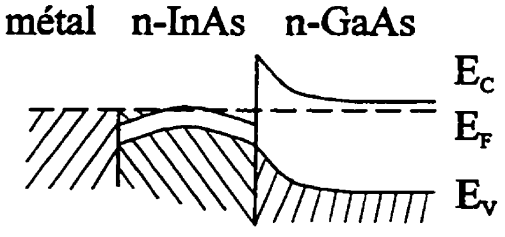
(a) jonction amorphe abrupte (b) jonction amorphe graduelle

Figure 1.6 Contacts avec zones amorphes.

est trop abrupte il en résulte une barrière de potentiel de hauteur non-négligeable. Cela est montré à la figure 1.6a. Si par contre, la transition est graduelle, tel qu'illustré à la figure 1.6b, il y a absence de toute barrière et la conduction peut se faire alors par sauts successifs entre les pièges situés dans la zone amorphe. Il suffit, pour cela, à créer une largeur de zone de transition assez large pour permettre une réduction substantielle de la hauteur de barrière liée à la jonction zone amorphe/semiconducteur.



(a) Hétérojonction avec interface non-abrupte



(b) Hétérojonction avec interface abrupte

Figure 1.7 Contacts avec hétérojonctions.

La seconde approche proposée par Aven et Swank (1969), et reprise par la suite par Woodall et al. (1981b), consiste à former une hétérojonction dont la composition métallurgique varie graduellement. Cette approche est illustrée à la figure 1.7a. La

couche graduée permet d'éliminer l'éventuelle présence d'une barrière de potentiel d'hauteur non-négligeable. Si cela n'était pas le cas, on se retrouverait avec la situation illustrée à la figure 1.7b.

L'existence possible d'une barrière de potentiel à l'hétérojonction peut s'avérer la contrainte principale au passage du courant et peut devenir ainsi, le facteur qui va limiter la valeur de la résistance de contact minimale du contact ohmique.

1.4.4 Formation de microphases et conduction par îlots

Les résultats expérimentaux ont établi que la résistance spécifique de contact varie en N_d^{-1} plutot qu'en $N_d^{-1/2}$ comme le prévoit la théorie du transport par effet de champ. Braslau (1981) a pris en considération les analyses expérimentales qui ont montré que l'interface métal/semiconducteur était le siège de réactions chimiques. La formation de différents composés chimiques crée une interface tourmentée. Braslau a suggéré un modèle de conduction qui suppose que le courant n'est pas le même en chaque point mais qu'il passe plutôt par certains agglomérats chimiques plus conducteurs que les autres composés présents. On représente, à la figure 1.8, une jonction métal/semiconducteur selon le modèle de Braslau.

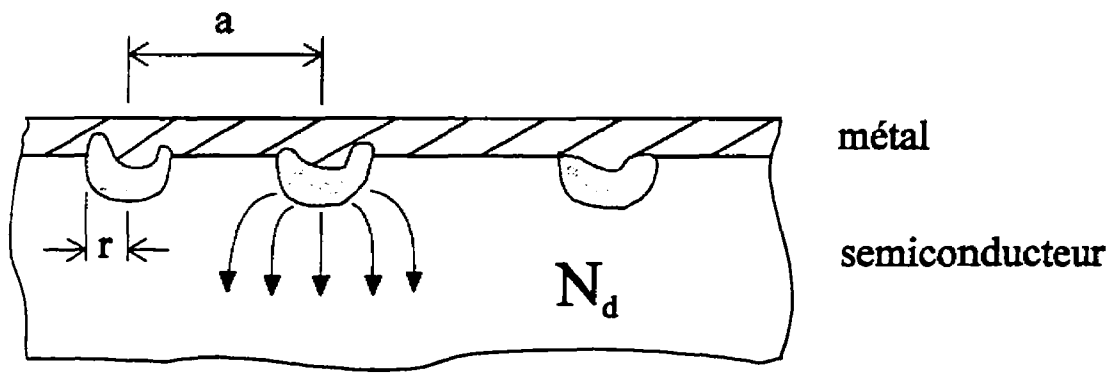


Figure 1.8 Jonction métal/semiconducteur selon le modèle de Braslau.

Le courant est rendu possible par un surdopage sous les îlots qui permet le passage des

porteurs par effet tunnel. Braslau a trouvé l'expression suivante :

$$r_c = \langle a \rangle^2 \left[\frac{\rho}{\pi \langle r \rangle} + \frac{r_c'}{2f\pi \langle r \rangle^2} \right] \qquad (1.13)$$

où ρ représente la résistivité de la région dopée N_d, r_c', la résistance spécifique associée au contact plan régulier et f, un facteur d'accroissement du champ électrique. Dans le cas où $\rho > 10^{-3}$ Ω-cm, on peut négliger le second terme de sorte que l'on a :

$$r_c \approx (\rho/\pi \langle r \rangle) \langle a \rangle^2 \qquad (1.14)$$

La résistance de contact est alors essentiellement due à la résistance d'étalement (Henisch, 1957). Du fait que l'on a $\rho \approx (N_d q \mu)^{-1}$, on obtient $r_c \propto N_d^{-1}$.

Chu et al. (1990) ont proposé un modèle phénoménologique de conduction similaire à celui de Braslau qui suggère que la densité de courant est inhomogène à travers la jonction et que la microstructure de l'interface est le facteur dominant qui détermine la résistance de contact. Les auteurs font toutefois remarquer que dans le cas des interfaces caractérisées par une microstructure complexe, il devient impossible de tenter de décrire le transport des porteurs au moyen d'un seul mécanisme. Ils préconisent l'emploi d'un modèle de transport de type multiple. Pour ce faire, ils considèrent séparément chaque élément de surface. Les mécanismes de transport qui sont présents entrent alors en compétition. Dans le cas le plus simple abordé par Chu et al., le mode de transport multiple se ramène à une combinaison linéaire des processus d'émission thermoionique et d'émission par effet de champ. Ce mode multiple permet d'expliquer la dépendance en température de r_c. Clausen et Leistiko (1993) ont repris ce même modèle et ont trouvé que l'émission thermoionique pouvait être seule responsable du comportement ohmique de certains types de contacts. Les composés auxquels on associe une faible hauteur de barrière permettent la conduction par émission thermoionique telle que proposée par Freeouf et Woodall (1981). C'est la concentration relative de chaque type de composé qui détermine le poids relatif de chaque mode de transport.

1.4.5 Recombinaison des porteurs

Une jonction métal/semiconducteur est caractérisée par une vitesse de recombinaison présente à l'interface. Plus cette vitesse de recombinaison est élevée, plus faible est la valeur de la résistance de contact. A la limite, une vitesse de recombinaison infinie ferait disparaître toute accumulation de charges à la surface et supprimerait ainsi la barrière de potentiel. On obtiendrait ainsi un contact ohmique idéal. Une autre approche consisterait ainsi à introduire des centres de recombinaison près de l'interface en endommageant la surface du semiconducteur. Si la densité de centres est assez élevée, la recombinaison dans la zone d'appauvrissement devient le mécanisme de conduction dominant et cause ainsi, une diminution significative de la résistance de contact. Cependant, cette alternative s'est avérée peu prometteuse du fait que la région endommagée attire des impuretés et génère des défauts ponctuels sous la couche endommagée. Le consensus actuel établit au contraire qu'il faut éviter d'endommager la surface pour assurer la stabilité à long terme du dispositif.

1.5 Analyse et conclusion

Plusieurs modèles ont été proposés pour expliquer l'origine de la barrière de potentiel à l'interface. Ces modèles font appel, suivant le cas, aux deux aspects suivants;

(1) états de surface;

(2) propriétés chimiques des constituants (formation de phases, chaleur de formation, électronégativité, ...).

Le modèle des défauts et le modèle du travail de sortie effectif s'avèrent aujourd'hui les modèles les plus vraisemblables pour rendre compte des observations expérimentales. Il n'est pas exclu que les mécanismes sur lesquels ils se fondent, puissent coexister ensemble. Pour la majorité des gens, le modèle des défauts apparaît comme étant le plus séduisant.

Il faut spécifier que l'étude de la jonction ohmique qui implique la formation de contacts alliés sur les semiconducteurs III-V est différente de l'étude précédente parce qu'elle met en jeu des interactions métallurgiques beaucoup plus importantes qui résultent en des zones interfaciales très tourmentées et plus larges. On peut également attribuer à ces zones interfaciales perturbées, la présence de densités de défauts élevées.

La formation de composés chimiques de diverses natures qui se traduit par la création de pavés ou d'îlots fait en sorte qu'il faut nécessairement parler, dans ce cas, de grandeurs effectives ou moyennes tel que le suggèrent les modèles de Braslau et de Chu et al. L'inhomogénéité spatiale de la jonction fait donc en sorte que la densité de courant est inhomogène. Contrairement aux autres modèles, dont celui de Braslau, le modèle de conduction multiple de Chu et al. n'attribue pas exclusivement à un seul mode de conduction unique, le transport des porteurs à la jonction ohmique. C'est la raison pour laquelle, il nous apparaît le plus vraisemblable. Cependant, ce modèle a le désavantage d'être non-analytique et d'être ainsi difficile à valider expérimentalement.

Malgré tous les faits expérimentaux qui démontrent qu'une vaste majorité de matériaux semiconducteurs réagissent avec les couches métalliques pour former des composés chimiques qui mènent à des interfaces très tourmentées, plusieurs auteurs conçoivent la formation d'une jonction ohmique selon l'image classique d'une largeur de barrière suffisamment diminuée par un fort dopage pouvant permettre une conduction uniforme par effet de champ. Toutefois, la présence d'un fort dopage qui est à la base du modèle classique demeure une condition essentielle pour réaliser un contact ohmique.

On concluera en retenant principalement que la formation d'un contact ohmique requiert la présence d'une zone fortement dopée et que la nature métallurgique de cette zone est le facteur qui gouverne les propriétés électriques de la jonction de même que les mécanismes de transport qui y sont présents.

CHAPITRE 2

Technologie et procédés de fabrication des contacts ohmiques

2.1 Introduction

Plusieurs étapes et procédés de fabrication sont nécessaires à la réalisation des contacts ohmiques. Ce chapitre relate les techniques et les procédés qui sont les plus fréquemment employés pour réaliser des jonctions ohmiques sur l'InP et autres composés III-V. La fabrication de contacts ohmiques sur les composés III-V a fait surgir de nouveaux problèmes que l'on ne retrouvait pas dans le cas des semiconducteurs élémentaires (Si, Ge). La décomposition du substrat et les nombreuses interactions métallurgiques qui ont lieu lors du recuit en constituent les causes majeures. Cela conduit à des problèmes de reproductibilité de même qu'à la dégradation et à la brisure des contacts. De plus, la création de composés chimiques mène à la formation de contacts non-homogènes. L'inhomogénéité latérale des contacts n'est pas compatible avec la réduction des dimensions des circuits intégrés.

Ces nouvelles difficultés techniques ont fait en sorte que de nouveaux développements technologiques ont été mis en oeuvre pour pallier à ces inconvénients. C'est notamment au niveau de l'étape du recuit que l'on a introduit de nouvelles techniques. Avant de décrire les procédés et techniques que l'on utilise usuellement, on discutera de la problématique reliée à la formation du contact ohmique. On mettra, dans ce chapitre, l'accent sur les avantages des procédés plutôt que sur une description exhaustive.

2.2 Approches de réalisation

2.2.1 Position du problème

La procédure de fabrication d'un contact ohmique consiste essentiellement à déposer une ou plusieurs couches métalliques sur la surface dopée d'un semiconducteur que l'on a préalablement attaquée légèrement, puis à procéder à un traitement thermique approprié.

Les problèmes reliés à la fabrication des contacts ohmiques se situent principalement au niveau de deux étapes : la préparation de la surface et le recuit. Pour fabriquer un contact ohmique, on doit idéalement chercher à former un contact intime entre le métal et le semiconducteur. Cependant, lorsqu'on nettoie chimiquement la surface, deux phénomènes empêchent la réalisation de cette situation idéale. L'exposition de la surface à l'air après l'attaque chimique génère la formation irrémédiable d'une couche d'oxyde et l'adsorption de divers éléments et molécules (hydrocarbures, oxygène). Il faut que la couche d'oxyde formée soit la plus mince possible afin que le dopant puisse diffuser dans le semiconducteur.

L'adsorption de molécules a essentiellement le même effet que la présence de l'oxyde de surface : elle réduit l'interaction physico-chimique entre le métal et le semiconducteur. La meilleure façon de remédier à ces deux problèmes est d'attaquer la surface du semiconducteur par plasma ou pulvérisation cathodique à l'intérieur de l'enceinte sous vide tout juste avant la déposition métallique.

Idéalement, le recuit a pour but de favoriser la diffusion du dopant à l'intérieur du semiconducteur et à créer, ainsi, une région fortement dopée. Cependant, dans le cas des contacts ohmiques sur les semiconducteurs III-V qui sont généralement à base d'or, le recuit favorise plutôt;

(1) la diffusion externe de l'élément du groupe V-b (P, As) en raison de sa grande volatilité;
(2) la diffusion de l'or dans le semiconducteur (l'or peut alors pénétrer profondément dans le semiconducteur et causer la dégradation du contact);
(3) la formation de différentes phases métallurgiques qui mène à une interface tourmentée.

Pour minimiser les réactions interfaciales trop prononcées et la diffusion excessive de l'or et de l'élément V-b, il faut;

(1) diminuer la quantité d'or déposée lors de la métallisation;
(2) réduire le plus possible la température et la durée du recuit en utilisant la technique de recuit rapide ("*rapid thermal processing*");
(3) utiliser une barrière contre la diffusion des éléments semiconducteurs.

On peut aussi, si cela est possible, choisir des structures qui ne contiennent pas d'or et qui favoriseront plutôt la simple diffusion du dopant. On emploie alors des métaux qui sont thermodynamiquement plus stables, tels le titane et le nickel. Cela permet d'obtenir

des contacts qui sont thermiquement plus stables et qui n'évoluent que très peu lors du fonctionnement du composant. Cela leur confère ainsi une meilleure fiabilité à long terme. On peut prendre, par exemple, le cas de la structure Pt/Ti/n-InP (Katz et al., 1990) qui exhibe un comportement ohmique sans subir de recuit et qui résulte en une interface presqu'abrupte. Mais dans le cas des composés III-V, ces systèmes sont rares.

La résistance de contact minimale est attribuée, pour plusieurs systèmes métal/semiconducteur, à la nature des composés chimiques présents à l'interface et à leur répartition spatiale. Mais il se pose, du point de vue technologique, un autre problème majeur; ce stade de l'évolution métallurgique, optimal du point de vue de la résistance électrique, peut-être difficile à atteindre de façon reproductible, surtout si l'interaction est rapide.

Pour obtenir la microstructure désirée, il est donc nécessaire de contrôler le plus rigoureusement possible le cycle de température T(t) du recuit. Cette microstructure est difficile à obtenir du fait qu'elle dépend aussi de plusieurs facteurs. Ce sont;

(1) l'épaisseur de la couche d'oxyde;
(2) la nature des contaminants adsorbés;
(3) l'épaisseur des couches métalliques;
(4) l'interdiffusion des éléments;
(5) la possibilité de multiples réactions chimiques entre les divers éléments.

C'est donc fondamentalement à l'étape du recuit que se pose la problématique reliée à la reproductibilité de contacts fiables.

2.2.2 Types de contacts ohmiques

On classe généralement les contacts ohmiques selon la nature des matériaux semiconducteurs qui constituent la région électriquement active et le traitement thermique qu'ils subissent. Ainsi, un contact ohmique peut être matériellement schématisé par les représentations suivantes;

(1) métal / SC^{++} ;
(2) métal / SC^{++} / SC ;
(3) métal / $SC1^{++}$ / SC2.

Chacun des cas représente respectivement;

(1) un contact formé sur un substrat entièrement dopé;
(2) un contact formé sur une couche implantée ou sur une couche épitaxiale de même nature que le substrat;

(3) un contact formé sur une couche épitaxiale de nature différente de celle du substrat.

On peut obtenir, dépendamment du traitement thermique que l'on fait subir au contact, un contact de type allié (*"alloyed contact"*) ou un contact de type fritté (*"sintered contact"*). La liquification, lors du recuit, de la couche métallique déposée à la surface caractérise le contact allié. Généralement, l'existence d'une région surfaciale fortement dopée avant le dépôt métallique est une condition préalable nécessaire pour réaliser un contact ohmique de faible résistance spécifique. La région près de la surface doit alors avoir une concentration de dopants de l'ordre de 10^{18} cm^{-3}. La réalisation de contacts ohmiques sur des semiconducteurs à large bande interdite s'avère difficile. En effet, ceux-ci présentent, en général, une barrière de potentiel plus élevée. On a alors recours, dans ce cas, à la formation d'une hétérojonction.

2.2.3 Contacts alliés

La formation d'un contact de type allié consiste à déposer une couche métallique (généralement un alliage à base d'or) qui contient un élément dopant sur une surface fortement dopée dans la plupart des cas, puis à effectuer un recuit à une température supérieure au point de fusion de l'alliage déposé. Il peut alors se produire, dépendamment de la nature du semiconducteur et des métaux employés, deux types de processus.

Dans le premier cas, une mince couche du semiconducteur est dissoute et se mélange au métal en fusion. En refroidissant, le semiconducteur se recristallise en formant une région fortement dopée. Il y a donc mixage du dopant dans le semiconducteur. Il semble que la recroissance cristalline soit le processus qui prévaut lors de la réalisation du contact AuGeNi/n-GaAs. La recroissance cristalline correspond toutefois à une image très simplifiée. En fait, il semble que le second processus, qui consiste en la formation de composés chimiques entre les éléments métalliques et semiconducteurs de même qu'à un mixage et à une diffusion du dopant, corresponde davantage à la réalité. Ce processus mène fréquemment à la formation d'îlots et à une morphologie de surface tourmentée. Les contacts alliés présentent aussi les inconvénients d'avoir une mauvaise définition des bords et une profondeur de pénétration inégale. Dans le cas des composés III-V, les phases formées peuvent être très complexes et dépendre de plusieurs facteurs (nature des éléments en présence, température de recuit, vitesse de refroidissement, épaisseur de la couche d'oxyde).

2.2.4 Contacts frittés

Le contact de type fritté est le résultat d'une interdiffusion en phase solide. Le recuit des contacts est effectué à une température inférieure à la température eutectique ou de fusion des éléments en présence. Tout comme dans cas du contact de type allié, il y a généralement formation de composés chimiques. Toutefois, comme il a été mentionné précédemment, les contacts réalisés avec des métaux ayant des points de fusion élevés génèrent beaucoup moins d'interactions métallurgiques. On associe ainsi davantage la formation de tels contacts à l'image classique du contact ohmique qui consiste en la formation d'une couche fortement dopée résultant de la diffusion du dopant. La surface des contacts frittés est plus uniforme et plus lisse que la surface des contacts alliés.

2.2.5 Contacts avec hétérojonction

Certains matériaux semiconducteurs présentent des hauteurs de barrière relativement élevées. C'est le cas notamment de n-GaAs et p-InP pour lesquels $\phi_b \approx 0{,}8$ eV. Il peut-être alors difficile de réaliser, dans ces cas, un contact ohmique de faible résistance spécifique de contact. On peut alors choisir l'approche qui consiste à déposer une couche semiconductrice fortement dopée d'un semiconducteur avec une bande interdite plus faible sur la surface du semiconducteur de plus grande bande interdite. Nous obtenons ainsi une hétérojonction qui combine une faible valeur de ϕ_b avec une faible largeur de barrière. La réalisation de cette hétérojonction doit satisfaire à certaines exigences. Il doit y avoir, en premier lieu, un bon accord de maille entre les deux réseaux pour éviter la présence de contraintes à la surface. Deuxièment, l'hétérojonction créée doit présenter une résistance de contact assez faible. Dans certains cas (Woodall et al., 1981b), il est nécessaire de réaliser, tel que décrit à la section 1.4.3, une jonction graduelle pour obtenir une résistance de contact plus faible à l'hétérojonction, car autrement il y aurait présence d'une barrière de hauteur non-négligeable à cette jonction. Dans d'autres cas, il suffit simplement d'ajouter une couche semiconductrice homogène. C'est le cas de la structure p-$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/p-InP.

2.2.6 Design de la structure métallique

Diverses techniques sont utilisées lors de la conception de la structure métallique du contact. On utilise notamment la formation de barrière de diffusion, la déposition de couche d'adhésion ou de mouillage, et la réalisation de structures multicouches ayant pour pour but de reproduire un alliage.

On emploie très souvent une barrière de diffusion dans les contacts ohmiques sur les composés III-V. La barrière de diffusion a un double rôle. Elle permet, dans un premier temps, à contrer la diffusion externe des éléments volatils du semiconducteur (P, As) et la diffusion interne des éléments métalliques. Elle permet, dans un deuxième temps, à empêcher les réactions métallurgiques entre certains constituants en les isolant chimiquement.

Les contacts ohmiques doivent présenter une bonne adhérence. Des métaux peuvent posséder un coefficient de collage trop faible sur certains semiconducteurs. Il faut alors déposer à la surface une mince couche d'un métal de nature différente. La couche déposée ne doit pas être trop épaisse afin de permettre la diffusion interne du dopant. L'épaisseur de la couche déposée se situe généralement entre 5 et 15 nm.

On peut parvenir à reproduire un alliage en déposant alternativement des couches métalliques minces dont le rapport des épaisseurs correspond à la composition eutectique du mélange. On évite, de cette façon, le problème de l'évaporation fractionnée propre à certains alliages.

La connexion des contacts nécessite la déposition d'une couche facile à souder (Au, Ag, Al) d'une épaisseur minimale de 100 nm. On peut, après le recuit du contact, ajouter une couche supplémentaire pour faciliter la connexion.

2.3 Techniques et procédés de fabrication

On présente, dans cette section, les principales étapes que nécessite la réalisation d'un contact ohmique. Il est important de souligner que la procédure de fabrication du contact doit être nécessairement compatible avec la fabrication du dispositif.

2.3.1 Formation d'une région surfaciale fortement dopée

La majeure partie des dispositifs est fabriquée sur des substrats semi-isolants. On doit, dans ce cas, créer des zones dopées. Les techniques qui s'y prêtent se divisent en deux groupes; celles qui créent une zone fortement dopée par l'ajout d'une couche semiconductrice formée par épitaxie et celles qui forment la région conductrice par l'apport d'atomes dopants à l'intérieur du semiconducteur. Les techniques épitaxiales sont;

(1) l'épitaxie en phase liquide ("*liquid phase epitaxy*" - LPE);
(2) l'épitaxie en phase vapeur ("*vapour phase epitaxy*" - VPE);
(3) l'épitaxie par faisceau moléculaire ("*molecular beam epitaxy*" - MBE).

Dans le second groupe, on retrouve les techniques de diffusion et d'implantation ionique. La technique de dopage par diffusion est aujourd'hui rarement utilisée car elle nécessite un chauffage à haute température de longue durée. Cela n'est pas compatible avec les procédés de fabrication des dispositifs du fait que la réalisation des contacts ohmiques constitue l'une des dernières étapes. Ce traitement thermique pourrait alors causer une dégradation des différentes parties du composant. La technique LPE est particulièrement utile pour faire croître des structures multicouches pour lesquelles un contrôle rigoureux du dopage et de la composition est nécessaire mais où l'épaisseur est moins critique. Toutefois, les couches épitaxiales de qualité supérieure sont obtenues avec la technique de croissance MBE. La raison principale réside dans le fait que ce procédé s'effectue sous ultra-vide (10^{-10} Torr). L'épaisseur des couches épitaxiales est de l'ordre de 0,5 μm.

2.3.2 Préparation de la surface

Les étapes concernant la préparation de surface sont le dégraissage, le polissage (s'il y a lieu) et l'attaque chimique. Le dégraissage s'effectue au moyen de solvants organiques. Si la surface de la gaufre n'est pas polie, il faut procéder à un polissage. La technique la plus fréquemment utilisée est celle du polissage mécano-chimique. La surface obtenue doit être exempte de stries. Après formation des motifs dans le masque, on doit procéder à une légère attaque de la surface. Les procédures de nettoyage qui sont utilisées doivent être compatibles avec la nature du masque présent sur le substrat. Les procédés de

nettoyage sont de deux types : les procédés d'attaque chimique et les procédés d'attaque sèche.

L'attaque de la surface vise idéalement à laisser une surface propre non-oxydée et exempte de tout contaminant. Dans la plupart des cas, on prépare la surface en attaquant chimiquement la surface. L'attaque chimique doit être suivie d'un rinçage à l'eau désionisée puis d'un séchage avec un jet de N_2 sec pour enlever les résidus d'hydrocarbone qui proviennent des solvants. Le procédé d'attaque chimique comporte deux inconvénients importants. Le premier réside dans le fait que l'attaque chimique est généralement non-anisotrope. Puisqu'il y a attaque latérale, il s'ensuit une perte de résolution du motif. Toutefois, le problème principal demeure le fait qu'après l'attaque chimique et le rinçage à l'eau désionisée, il se forme irrémédiablement une couche d'oxyde. En effet, une courte exposition de la surface à l'air avant la mise sous vide suffit à créer une couche d'oxyde. Pour une surface initialement propre, une exposition à une pression de 10^{-5} Torr suffit, dans l'hypothèse où toutes les molécules adhèrent à la surface, à former une monocouche en 10^{-1} seconde (Rhoderick, 1988). Pour remédier à ces problèmes, certains utilisent des techniques d'attaque assistée par plasma comme la pulvérisation cathodique ("*etch sputtering*") et l'attaque avec ions réactifs ("*reactive-ion etching*" - RIE). Ces techniques ont l'avantage d'être utilisées sous vide juste avant la déposition métallique. Cela diminue ainsi grandement le risque de contamination et la formation de toute couche d'oxyde substantielle. Contrairement à la technique RIE, le nettoyage par pulvérisation cathodique offre une plus faible sélectivité d'attaque, c'est-à-dire qu'il attaque les matériaux à des taux qui sont sensiblement les mêmes.

2.3.3 Formation du masque

Les masques qui sont utilisés pour former les motifs métalliques peuvent être de diverses natures. Parmi les matériaux les plus souvent utilisés, il y a la photorésine (PR), le SiO_2 et le Si_3N_4. Il existe deux types de PR : positive et négative. L'emploi de la PR positive nécessite l'emploi du procédé de lift-off alors que l'emploi de la PR négative requiert une attaque chimique du métal déposé. Comme la réalisation des contacts ohmiques nécessite l'emploi de métaux nobles (Au, Ag) qui sont difficilement attaquables, on préfère utiliser le procédé de lift-off. Le choix de la nature du masque employé dépend des métaux et de la technique de déposition utilisée. La réalisation de couches de SiO_2 ou

Si_3N_4 de bonne qualité nécessite l'utilisation de techniques plus complexes telles la pulvérisation cathodique RF, la déposition par plasma et la déposition chimique en phase vapeur.

2.3.4 Déposition métallique

La déposition des couches métalliques peut s'effectuer selon diverses techniques. Celles que l'on utilise le plus fréquemment sont;

(1) l'évaporation thermique;
(2) l'évaporation par faisceau électronique;
(3) la pulvérisation cathodique.

Nous avons utilisé, aux cours de nos manipulations, les deux premières techniques. Avant de décrire les techniques de déposition, on donnera quelques remarques générales. Si le procédé de lift-off est utilisé, on doit, si possible, maintenir l'échantillon à une température inférieure à 100 °C pour prévenir la polymérisation de la photorésine. Lorsqu'on veut évaporer un alliage, on doit l'évaporer en entier pour préserver sa stœchiométrie. Il est souhaitable d'utiliser un groupe à vide muni d'un système de pompage fonctionnant sans huile pour éviter la contamination des substrats et de la chambre à vide.

L'évaporation thermique consiste à évaporer des métaux et alliages par effet Joule. Les sources métalliques sont déposées dans des bateaux (W, Ta, Mo) ou sur des filaments (W). C'est une technique qui est fréquemment utilisée pour évaporer des métaux qui ont des points de fusion peu élevés ($T < 1200$ °C). On peut parvenir à évaporer des métaux réfractaires mais il faut utiliser cependant une faible quantité de métal et être muni d'une source d'énergie suffisamment puissante. Ce procédé comporte aussi d'autres inconvénients dont celui de la contamination de la source métallique par l'élément chauffant. L'évaporation isotrope de la source métallique fait en sorte qu'une quantité appréciable de métal est gaspillée.

Le recours à l'évaporation par faisceau électronique pallie aux problèmes précédents. L'utilisation de creusets en graphite de forme concave permet une évaporation plus propre et plus directionnelle. Grâce aux températures élevées produites par les collisions électroniques, on est en mesure avec ce procédé, d'évaporer tous les métaux. La possibilité de disposer de plusieurs sources métalliques à la fois constitue un autre avantage. Cependant, cette technique a un inconvénient. L'emploi de la photorésine ne

convient pas toujours à ce procédé de déposition du fait que sous l'effet des radiations émises et des hautes températures atteintes la photorésine se polymérise. Cela se produit surtout lorsqu'on évapore des métaux qui ont des points de fusion élevés (Pt, Ti, W). On peut amoindrir cet effet en refroidissant le substrat ou en diminuant l'épaisseur des couches métalliques. Si ces deux mesures ne suffisent pas, il faut avoir recours à un masque de nature différente (SiO_2, Si_3N_4).

L'évaporation de certains alliages (AuSn, AuZn) au moyen des deux techniques précédentes peut mener à des dépôts non-uniformes en raison de la différence importante des points de fusion et des tensions de vapeur. L'élément dont la tension de vapeur est la plus élevée a tendance à s'évaporer en premier. Pour éviter cela, on utilise la technique de déposition par pulvérisation cathodique ("*sputtering*"). Ce procédé permet de déposer des couches d'alliage uniformes. Le principe de base de ce procédé est le suivant; un flux d'atomes ionisés (Ar^+) est accéléré vers la source métallique et expulse les atomes du métal par transfert d'impulsion. Il n'y a pas de chauffage excessif lors de ce processus. Tout comme pour l'évaporation par faisceau électronique, ce procédé offre les avantages de disposer de plusieurs sources et de créer un faisceau d'évaporation directionnel. De plus, il est plus facile de contrôler le taux de déposition et il y a moins de contamination. Cependant, cette technique se prête mal avec le procédé du lift-off en raison du bon "*step-coverage*" qu'il produit.

Le chauffage des substrats avant et pendant la déposition a plusieurs effets. Dans le cas de l'InP par exemple, le chauffage cause la désorption des molécules d'eau et des composés P_2O_3 (180 °C) et P_2O_5 (325 °C). Malina et al. (1994b) soulignent que le maintien du substrat d'InP à une température de 50 °C a pour effet, dans le cas de la structure Au/AuZn/p-InP, de réduire drastiquement l'influence du taux de déposition. Tseng et al. (1981) ont même observé dans le cas de la structure AuGeNi/n-InP une dépendance de la nature électrique du dopant en fonction de la température du substrat.

2.3.5 Recuit

Le recuit des contacts se fait dans des fours sous le flux d'un gaz neutre ou réducteur (H_2, N_2, H_2-N_2) pour éviter la contamination et l'oxydation des échantillons. Pour éviter la décomposition du semiconducteur et pour ne pas affecter les propriétés des dispositifs, on doit viser à effectuer des recuits de courtes durées à des températures les plus basses

possibles. Pour être en mesure de faire le recuit en un court laps de temps, on a introduit la technique de recuit rapide ("*rapid thermal processing*"). Cette technique permet des montées et des descentes rapides de température. Le four utilisé doit posséder une faible inertie thermique. Ces variations rapides de température permettent un meilleur contrôle de la microstructure dû fait que le recuit s'effectue à un seul plateau de température.

Si on veut maximiser l'étape du recuit, on doit employer des faisceaux lasers ou des faisceaux d'électrons qui ont la propriété de chauffer le contact très rapidement (inférieur à 1 ms) et d'atteindre des températures beaucoup plus hautes sans que la chaleur diffuse dans le substrat.

2.4 Caractérisation électrique

Le comportement électrique des contacts ohmiques est caractérisé par la résistance spécifique de contact r_c (Ω-cm^2). Cette caractéristique peut également être donnée par la résistivité spécifique de contact (Ω-mm) dans le cas des contacts rectangulaires de types horizontaux pour lesquels on a fixé la profondeur comme étant égale à 1 mm.

L'évaluation de la résistance spécifique de contact pose certains problèmes. La principale difficulté consiste à séparer les différentes résistances dont la somme représente la résistance totale R_t entre deux contacts. Ces différentes résistances sont la résistance de contact, la résistance d'étalement ("*spreading resistance*") qui est due à la courbure du champ électrique en certains endroits, la résistance du semiconducteur et les résistances résiduelles (sondes de mesure). On négligera, dans les développements qui vont suivre, la résistivité de la couche métallique. Cette approximation n'est pas valable dans le cas où la couche métallique extérieure est de résistivité non-négligeable. C'est le cas, par exemple, du nickel et du platine. On suppose donc que le contact est recouvert d'une couche à base d'or ou d'argent. On doit établir pour chaque terme résistif (si cela est possible) l'expression mathématique qui s'y rattache. La valeur de R_t est toujours celle que l'on mesure (calcule) expérimentalement. La détermination de r_c pose également des problèmes au niveau de la reproductibilité. On observe souvent, malgré l'utilisation de substrats identiques, des valeurs différentes de r_c. Il semble que les contacts alliés soient ainsi moins reproductibles que les contacts frittés.

Plusieurs méthodes ont été élaborées dans le but de déterminer expérimentalement la valeur de r_c. On peut diviser ces méthodes en deux groupes. Il y a celles qui s'appliquent

aux substrats entièrement dopés et celles qu'on utilise sur des régions dopées uniquement en surface (couches épitaxiales ou zone implantée). On donnera ici une description des méthodes qui sont les plus couramment utilisées. Selon Harrison et Reeves (1992), c'est la méthode des ponts de Kelvin (Proctor et Linholm, 1982) qui s'avère la plus précise. On peut déterminer avec cette méthode des valeurs de r_c de l'ordre de 10^{-7} Ω-cm^2 alors que l'on associe respectivement des résolutions de 10^{-5} et 10^{-6} Ω-cm^2 à la méthode de Cox et Strack, et aux méthodes relatives au modèle TLM. Robinson estime que le pourcentage d'erreur lié à la méthode des quatre pointes se situe autour de ± 10%.

2.4.1 Méthodes de caractérisation pour contacts horizontaux

La majeure partie des méthodes développées pour déterminer la valeur de r_c pour ce type de contact est basée sur le modèle électrique de la ligne de transmission (TLM) proposé initialement par Shockley (1964) et développé indépendamment par la suite par Murrmann et Widmann (1969) et Berger (1969). Les méthodes TLM à géométrie circulaire possèdent l'avantage de ne pas nécessiter d'isolation électrique de la couche semiconductrice. Cette isolation est nécessaire dans le cas des contacts rectangulaires pour éliminer le courant latéral. On réalise cette isolation au moyen d'une attaque mésa. On tiendra cependant compte de la possibilité que la diffusion et l'interaction métallurgique entre les divers éléments présents à l'interface puissent modifier de façon substantielle la résistivité de la couche semiconductrice sous le contact. On attribuera, ainsi, une valeur de résistance carrée R_{sk} différente de celle (R_{sh}) de la couche semiconductrice sise entre les plots.

L'ensemble des équations qui se rapporte à la modélisation du contact de type rectangulaire au moyen du modèle de la ligne de transmission, et qui conduit à l'expression de r_c est développé dans l'annexe A. Il faut souligner que l'on n'a pas tenu compte, dans ce développement, de la structure verticale de la couche semiconductrice. On peut ignorer la dimension verticale de cette couche dans le cas où l'on a l'inégalité;

$$\beta = \frac{r_c}{\rho_c h} >> 0{,}19 \qquad (2.1)$$

où ρ_c représente la résistivité de la couche semiconductrice, et h, l'épaisseur de la couche.

2.4.1.1 Méthode d'extrapolation avec espacements variables

La méthode d'extrapolation à espacements variables est dérivée de la méthode d'extrapolation développée par Shockley (1964). La méthode de Shockley est aujourd'hui très peu utilisée en raison de son imprécision qui résulte de sa géométrie. Elle a été remplacée par cette méthode qui se base sur le même principe mais qui est plus précise. La structure test est illustrée à la figure 2.1. Elle est constituée d'un ensemble de N plots identiques de largeur d et de profondeur W déposés sur une couche semiconductrice rectangulaire électriquement isolée. L'espacement x_j entre les plots varie graduellement en fonction de leur position. La valeur de la résistance totale entre deux plots adjacents est donnée par l'expression;

$$R_t = 2 R_c + R_{sh} x_j / W \qquad (2.2)$$

où R_c représente la résistance d'un plot entre le plan interfacial X et le plan Y, (voir figure A.2) et R_{sh} la résistance carrée de la couche semiconductrice entre les plots. Il est à noter que R_c devient à toute fin pratique indépendant de la longueur d du contact pour un contact électriquement long ($d > 2 L_t$). La valeur L_t représente la longueur de transfert du contact, i.e. la distance à partir du bord du contact pour laquelle le courant chute à 1/e de sa valeur totale. La condition $d > 2 L_t$ est nécessaire à l'applicabilité de la méthode. On suppose que R_c est le même pour chaque contact. En tenant compte de la condition et l'inégalité $d > 2 L_t$, on peut approximer l'expression A.20 par;

$$R_{sk} \approx R_c W / L_t \qquad (2.3)$$

L'expression 2.2 devient; $$R_t = 2 R_{sk} L_t / W + R_{sh} x_j / W \qquad (2.4)$$

et correspond à la droite tracée au moyen des valeurs expérimentales. Le graphe $R_t(x_j)$ est illustré à la figure 2.2.

Grâce aux expressions théoriques tirées du modèle électrique de la ligne de transmission, on est en mesure de relier R_c, R_e et r_c aux valeurs d, R_{sk} et L_t :

$$L_t = d/\cosh^{-1}(R_c/R_e) \qquad (A.15) \qquad\qquad r_c = R_{sk} L_t^2 \qquad (A.23)$$

La procédure nécessite la mesure de deux tensions pour chaque espacement. La première mesure servira à déterminer la valeur de la résistance de contact R_c (*"front resistance"*) alors que la seconde permet de déterminer la valeur de la résistance de

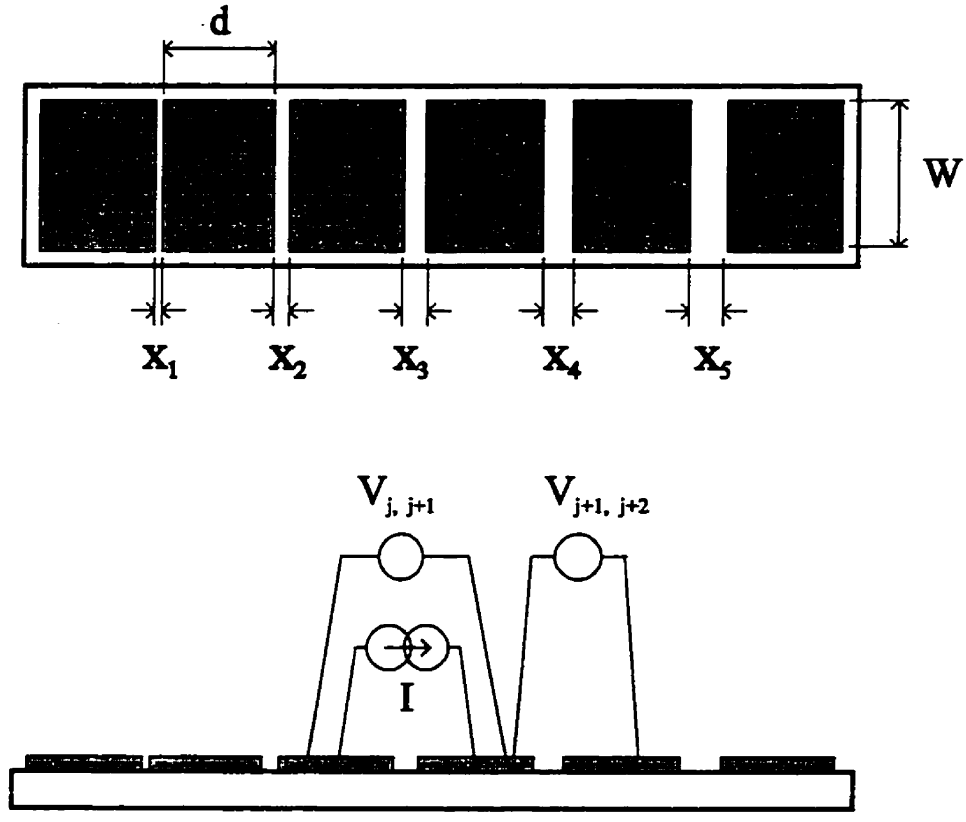


Figure 2.1 Méthode d'extrapolation avec espacements variables.

transfert R_e (*"end resistance"*). La détermination de R_e s'avère obligatoire si l'on a l'inégalité $R_{sh} \neq R_{sk}$ (Reeves et Harrison, 1982).

Voici la façon de procéder. On injecte un courant constant $I_{j, j+1}$ entre chaque couple de plots adjacents puis on mesure successivement les tensions $V_{j, j+1}$ et $V_{j+1, j+2}$. Le deuxième type de mesure s'effectue ainsi au moyen de trois plots voisins. On obtient en tout N-1 valeurs de $V_{j, j+1}$ et N-2 valeurs de $V_{j+1, j+2}$ (Il faut noter que l'on peut prendre en tout 2(N-2) valeurs de tension pouvant servir à déterminer R_e puisqu'en théorie les valeurs des tensions $V_{j-1, j}$ et $V_{j+1, j+2}$ sont les mêmes). Les tensions $V_{j, j+1}$ et $V_{j+1, j+2}$ serviront à calculer respectivement les valeurs $R_t(x_j)$ et R_e. Il est à noter que R_e est

indépendant de x_j. On peut donc effectuer la moyenne des N-2 valeurs calculées.

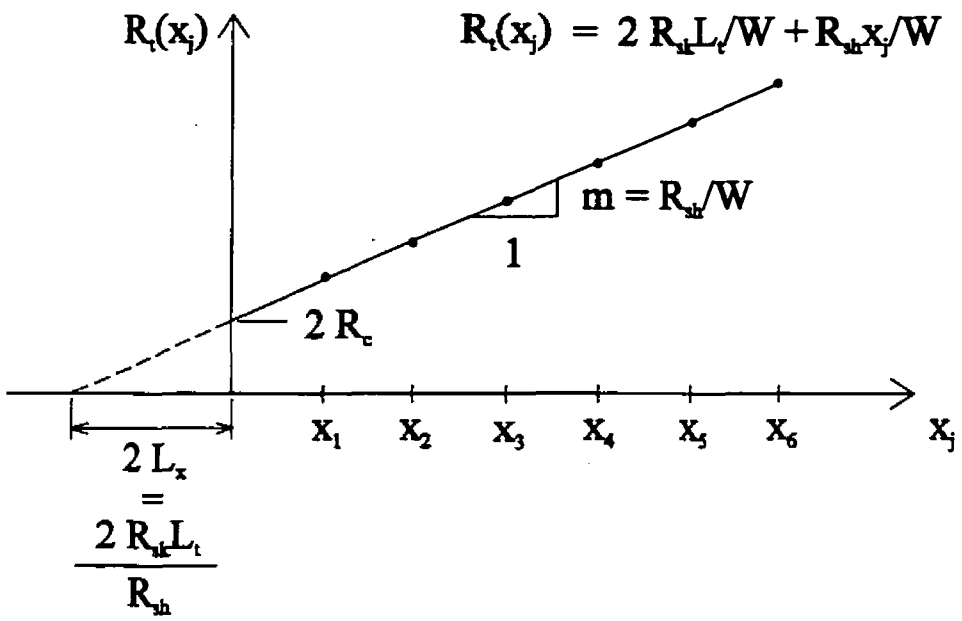


Figure 2.2 Graphique de R_t en fonction de x_j.

La procédure générale pour déterminer r_c se résume ainsi;

1. Mesure des tensions : (a) Injection d'un courant constant I entre les plots j et j +1
   (b) Mesure de la tension $V_{j,j+1}$ (N-1 mesures en tout)
   (c) Mesure de la tension $V_{j+1,j+2}$ (N-2 mesures en tout)
2. Calcul de R_c et R_{sh} : (a) Calcul des $R_t(x_j)$: $R_t = V_{j,j+1} / I_{j,j+1}$ (2.5)
   (b) Tracé de la droite $R_t(x_j)$ et extrapolation de la valeur $R_t(0)$
   (c) Calcul de R_c : $R_c = R_t(0)/2$ (2.6)
   (d) Calcul de R_{sh} au moyen de la pente m du graphe qui correspond à la valeur R_{sh}/W : $R_{sh} = mW$ (2.7)
3. Calcul de R_e : $R_e = V_{j+1,j+2} / I_{j,j+1}$ (2.8) (moyenne des N-2 valeurs)
4. Calcul de L_t : $L_t = d/\cosh^{-1}(R_c/R_e)$
5. Calcul de R_{sk} : Vérifier la condition $d \geq 2L_t$; si tel est le cas; $R_{sk} \approx R_cW/L_t$ (2.3)
6. Calcul de r_c : $r_c = R_{sk}L_t^2$ (A.23)

2.4.1.2 Méthode des trois contacts

Cette méthode a été proposée par Berger (1972). Le dispositif est constitué de trois plots rectangulaires identiques mais espacés différemment tel qu'illustré à la figure 2.3. La procédure de mesure est similaire à la procédure de la méthode précédente. On détermine

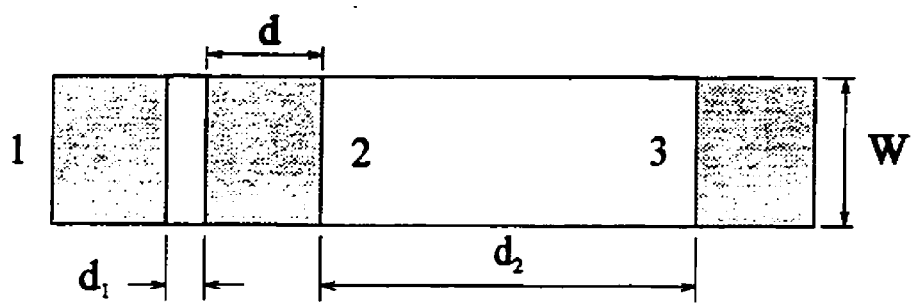


Figure 2.3 Méthode des trois contacts.

les résistances totales R_{12} et R_{23} de même que la résistance de transfert R_e (moyenne des 2 valeurs calculées) de la même façon que précédemment. On a les relations suivantes;

$$R_{12} = 2R_c + d_1R_s \qquad (2.9)$$
$$R_{23} = 2R_c + d_2R_s \qquad (2.10)$$

desquelles on tire les expressions;

$$R_s = \frac{R_{12} - R_{23}}{d_1 - d_2} \qquad (2.11) \qquad R_c = \frac{R_{12} - d_1R_s}{2} \qquad (2.12)$$

Les valeurs de R_c et R_e étant connues, on trouve r_c en refaisant les étapes 4, 5 et 6 de la section précédente.

On a préconisé, récemment, l'emploi de plots élargis qui dépassent la structure mésa tel qu'illustré à la figure 2.4. Ce type de structure comporte plusieurs avantages qui sont;

(1) l'utilisation de plus faibles valeurs de d et W permet de déterminer r_c avec plus de précision;

(2) éliminer l'effet de tout courant latéral;
(3) les sondes de mesure étant placées à l'extérieur de la région considérée, il n'y a aucune perturbation de la zone interfaciale.

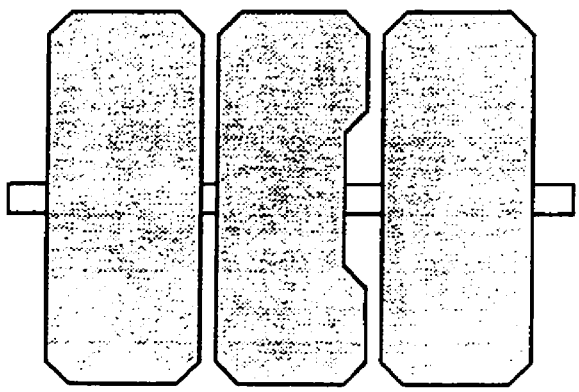


Figure 2.4 Technique des contacts allongés.

2.4.2 Méthodes de caractérisation pour substrats entièrement dopés

2.4.2.1 Méthode des quatre pointes

La méthode des quatre pointes a été conçu par Terry et Wilson (1969). Cette méthode présente une géométrie simple qui est facile à réaliser et qui ne nécessite que deux mesures de tension. Kuphal (1981) a apporté des changements à la méthode de Terry et Wilson. Il a changé la procédure de mesure et a apporté une modification à l'expression originale de r_c en y introduisant la résistance d'étalement R_{sp} ("*spreading resistance*") sous les plots

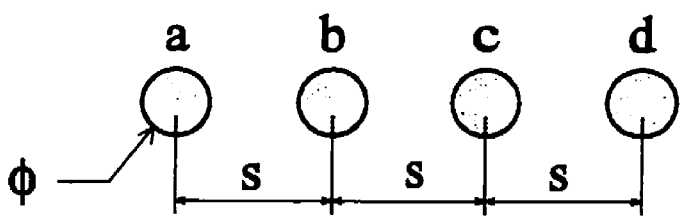


Figure 2.5 Méthode des quatre pointes.

intermédiaires. Le dispositif de mesure, qui est montré à la figure 2.5, est composé de quatre plots circulaires équidistants, de même diamètre ϕ, disposés selon une droite sur un substrat d'épaisseur t.

L'expression de la résistance spécifique de contact est;

$$r_c = \frac{A}{I_{ad}} \left(V_{ab} - I_{ad} R_{sp} - V_{bc} \frac{\ln[3(s/\phi) - 1/2]}{2\ln 2} \right) \qquad (2.13)$$

Les trois termes correspondent respectivement à la résistance entre les plots a et b, à la résistance d'étalement et à la résistance du matériau. La résistance d'étalement R_{sp} est donnée par l'expression 2.14;

$$R_{sp} = \frac{4r_c}{\pi\phi^2} \left[\frac{\sum_{m=0}^{\infty} y^m / [2^{2m}(m!)^2]}{\sum_{m=0}^{\infty} y^m / [(m+1)2^{2m}(m!)^2]} - 1 \right] \qquad (2.14)$$

$$\text{avec} \quad y = \frac{\rho\phi^2}{4r_c t} \qquad (2.15)$$

La procédure de mesure proposée par Kuphal est la suivante;

(1) on injecte un courant continu I_{ad} entre les plots a et d;

(2) on mesure les tensions V_{ab} et V_{bc}.

Remarques

(1) dans le cas où $y \leq 1$ et que $R_{sp} \leq 0{,}12\ R_c$, la résistance d'étalement devient alors négligeable dans la plupart des cas;

(2) la méthode devient impraticable dans le cas où l'épaisseur du substrat est très mince car, dans ce cas, ϕ doit être très petit;

(3) en injectant le courant entre les mêmes plots, la distribution du potentiel reste inchangée.

2.4.2.2 Méthode de Cox et Strack

La méthode de Cox et Strack (1967) est une méthode qui est fréquemment employée. Le dispositif de mesure consiste en la formation d'un certain nombre de plots de différents diamètres que l'on dépose sur la surface à caractériser et à la métallisation entière de la surface arrière. La procédure consiste à injecter un courant constant I entre chaque plot et la surface arrière du substrat. Avec les valeurs de tension mesurées, on calcule la résistance totale que l'on reporte sur un graphe en fonction de ϕ^{-1}, où ϕ est le diamètre des contacts. L'extrapolation de l'ordonnée à l'origine correspond à R_0 tandis que la pente à R(0) correspond à $\rho/2$. L'expression de R_t comprend quatre termes qui sont la résistance de contact, la résistance d'étalement, un terme correcteur qui tient compte de l'épaisseur finie t du substrat et la résistance résiduelle R_0. Pour que l'expression 2.16 soit valide, on doit satisfaire la condition $\phi < 2t$.

$$R_t = \frac{4r_c}{\pi\phi^2} + \frac{\rho}{2\phi} - \frac{\rho}{4\pi t} + R_0 \qquad (2.16)$$

2.4.3 Autres méthodes de caractérisation

Parmi les autres méthodes de caractérisation élaborées, on retient surtout la méthode TLM à géométrie circulaire (Reeves, 1980) de même qu'une variante de cette dernière qui a été développée par Marlow et Das (1982). Ces deux méthodes servent à caractériser le contact de type horizontal. Le grand avantage de ces deux méthodes est le fait qu'elles ne nécessitent pas d'attaque mésa de la couche semiconductrice fortement dopée.

Barnes et Paoli (1976) ont développé une méthode pour déterminer les caractéristiques électriques d'une diode laser. Parmi ces caractéristiques, il y a la résistance série R de la diode. On ne détermine pas, avec cette méthode, la résistance spécifique de contact du contact ohmique mais plutôt la résistance série totale de la diode. On peut, dans certains cas, attribuer à un contact ohmique (type n ou p), la majeure partie de la résistance totale du dispositif. La méthode de Barnes et Paoli est développée à l'annexe B.

CHAPITRE 3

L'art du contact ohmique sur InP

3.1 Introduction

Le phosphure d'indium est un semiconducteur III-V utilisé principalement dans la fabrication des diodes LED, des diodes lasers et des transistors (HBT, FET). De tous les composés III-V, c'est le GaAs qui a fait l'objet des premières recherches en raison de ses applications commerciales importantes. La technologie développée a ensuite été appliqué à l'InP et aux autres composés.

La fabrication de contacts ohmiques sur le phosphure d'indium pose certains problèmes. Ces problèmes (volatilité du phosphore, formation de composés chimiques indésirables) apparaissent principalement lors du recuit. Il en résulte des problèmes de reproductibilité, de stabilité chimique et de durée de vie. Si les contacts ohmiques réalisés sur n-InP présentent des résistances spécifiques de contact relativement faibles ($\approx 10^{-6}$ Ω-cm^2), il en n'est pas de même dans le cas du substrat de type p ($\approx 5 \cdot 10^{-5}$ Ω-cm^2). La raison principale est que, contrairement au GaAs, le substrat p-InP présente une hauteur de barrière beaucoup plus élevée ($\phi_{bp} \approx 0,8$ eV) que le substrat de type n ($\phi_{bn} \approx 0,45$ eV). Il faut ajouter à cela, le fait qu'il existe peu d'éléments de type accepteur qui peuvent être employés comme dopant lors de la métallisation.

Ce chapitre passe en revue les propriétés de l'InP et des différents systèmes métal/InP qui sont les plus souvent employés lors de la fabrication de contacts ohmiques sur ce semiconducteur. Une description des procédés qui sont usuellement utilisés est également donnée. On donne à l'annexe C, les données et les résultats des principaux travaux publiés.

3.2 Propriétés du phosphure d'indium

Le phosphure d'indium a un gap direct de 1.3 eV. Il possède, comme la plupart des composés III-V, une structure cubique de type zincblende. Son paramètre de maille est

de 5.8689 Å. Ce cristal ne possède pas de centre d'inversion. La conductivité thermique de l'InP est relativement élevée avec une valeur de 0,74 $Wcm^{-1}K^{-1}$.

Le lien chimique entre les éléments des composés III-V comporte, contrairement aux semiconducteurs élémentaires du groupe IV, un certain transfert de charge. Ce transfert de charge fait en sorte que les surfaces idéales (100) et (111), qui sont composées d'atomes identiques, sont polaires, alors que la surface (110), constituée d'un même nombre d'atomes du groupe III et V, est non-polaire. Cet aspect ionique influence les propriétés surfaciques. Cela se manifeste notamment lors du clivage : malgré le fait que la densité d'atomes sur le plan (111) soit plus faible, le clivage s'effectue suivant le plan (110). C'est la raison pour laquelle il n'a pas été possible d'étudier la surface propre (100). La surface (100) attaquée chimiquement, ou par bombardement ionique, est caractérisée par un fort ancrage du niveau de Fermi qui se situe dans la même plage d'énergie que l'on retrouve dans le cas où la surface clivée (110) présente une densité de défauts de clivage assez élevée. Pour ce dernier cas, l'ancrage se situe à 0,4 eV en-dessous de la bande de conduction. Dans leurs travaux, Palau et al. (1985) ont associé les surfaces (110) et (100) de l'InP à un modèle d'états donneurs et accepteurs discrets. Ils expliquent les variations expérimentales de l'ancrage du niveau de Fermi par la proportion des défauts que l'on retrouve à la surface. La proportion des défauts serait modulée par la préparation de la surface et par les caractères physico-chimiques de l'interaction entre les principaux constituants. L'influence de la nature du métal, bien qu'assez faible, semblerait plus liée à sa réactivité qu'à son travail de sortie.

Le phosphure d'indium est fortement covalent. Le phosphore est l'ion anion alors que l'indium est l'ion cation. Habituellement, les dopants de type donneur se substituent aux atomes d'indium alors que les éléments de type accepteur se substituent aux atomes de phosphore. La nature du dopant que l'on retrouve dans l'InP dépend du procédé de dopage employé. Dans le cas où les substrats sont dopés sur tout le volume, on retrouvera, dans le cas du type n, les dopants étain (Sn) ou soufre (S). L'étain se substitue à l'atome d'indium alors que le soufre occupe la position de l'atome de phosphore. La valeur de la concentration maximale qui a été rapportée par Thompson et al. (1970) est de $3 \cdot 10^{19}$ cm^{-3} (S). La technique que l'on emploie le plus fréquemment pour créer une région dopée surfaciale de type n est l'implantation ionique d'atomes de silicium (Si). On crée également des couches épitaxiales dopées au soufre et au tellure (Te). Parmi les autres éléments pouvant jouer le rôle de dopant de type n, il y a le germanium (Ge) et le

titane (Ti). L'apport de ces dopants s'effectue uniquement lors de la métallisation de la surface. Les substrats de type p sont dopés avec des atomes accepteurs peu profonds tels le zinc (Zn), le béryllium (Be), le mercure (Hg) ou le cadmium (Cd). Parmi ceux-ci, c'est le zinc qui est, de loin, le plus souvent employé. La plus forte concentation de dopant qui a été rapportée dans la littérature dans le cas du substrat de type p, est de $7 \cdot 10^{18}$ cm^{-3} (Zn) (Tuck et al., 1977). Le magnésium (Mg) est aussi un élément qui se comporte comme un dopant de type accepteur dans l'InP. L'apport du magnésium se fait au moyen de la technique de croissance épitaxiale.

Les structures métal/n-InP présentent des hauteurs de barrière ϕ_{bn} se situant entre 0,4 et 0,5 eV alors que ϕ_{bp} se situe entre 0,75 et 0,85 eV. L'InP ne suit donc pas la règle de Mead.

3.3 Nettoyage de la surface de l'InP

La chimie de la surface d'InP attaquée chimiquement est complexe. Plusieurs espèces d'oxydes peuvent coexister à la surface de l'InP. Ce sont notamment les oxydes In_2O_3, $In(OH)_3$, $InPO_4$, P_2O_5 et H_3PO_4. Les solutions d'attaque chimique employées sur l'InP se divisent en deux groupes : celles qui sont à base de brome et celles qui sont à base d'acides. On retrouve généralement ces solutions sous les formes suivantes;

(1) Br_2-CH_3OH (2) H_2SO_4-H_2O_2-H_2O $K_2Cr_2O_7$-H_2SO_4-HCl

Br_2-HBr-H_2O HF-H_2O HCl-H_2O_2-H_2O

Parmi ces solutions, celles qui sont les plus fréquemment employées sont;

(1) H_2SO_4:H_2O_2:H_2O (3:1:1) (2) HF:H_2O (1:n) avec n = 0 et 10

Il faut signaler que la solution à base de H_2SO_4 attaque principalement l'InP et très légèrement les oxydes de surface. C'est la raison pour laquelle on procède à l'occasion à une attaque préliminaire avec une solution de HF qui n'attaque que la couche d'oxyde. On doit faire remarquer que l'acide fluorhydrique (HF) n'est pas pur. La solution ne contient que 49% de HF. Le taux d'attaque de la solution $3H_2SO_4$: $1H_2O_2$: $1H_2O$, à T = 50 °C, est de 0,19 µm/min (Kuphal, 1981). Ismail et al. (1984) ont trouvé que les surfaces d'InP attaquées avec cette solution comportent de l'oxyde résiduel et du carbone en quantité relativement faible et qu'elles étaient surtout très pauvres en phosphore.

Guivarc'h et al. (1984) ont réalisé une étude importante sur diverses solutions d'attaque employées sur l'InP. Ils ont trouvé que les solutions à base de brome laissaient

des traces d'oxydes instables riches en phosphore. Les auteurs affirment également que la réalisation de contacts ohmiques à base d'or nécessite des procédures de nettoyage qui donnent une surface dont la couche d'oxyde est la plus mince possible (d < 10 Å). Une couche d'oxyde plus épaisse pourrait ne pas permettre d'interactions métallurgiques jusqu'à une température de 470 °C. Leurs résultats montrent que les solutions qui mènent à une surface propre, stable et peu oxydée sont;

(a) HF(49%) pendant 30 secondes.

(b) Procédure HLH employée dans la technologie du Si :

(1) $NH_4OH:H_2O_2:H_2O$ (5:1:100) pendant 20 minutes à 80 °C;

(2) rinçage à l'eau désionisée et séchage avec N_2;

(3) $HCl:H_2O_2:H_2O$ (10:5:100) pendant 20 minutes à 80 °C;

(4) rinçage à l'eau désionisée et séchage avec N_2.

Il faut noter qu'ils n'ont pas étudié la solution $3H_2SO_4$: $1H_2O_2$: $1H_2O$. Wager et al. (1981) font remarquer qu'un trempage ou un rinçage prolongé à l'eau désionisée augmente significativement la croissance des oxydes d'indium et de phosphore.

Le nettoyage par pulvérisation cathodique avec ions d'Ar^+ est efficace pour enlever la couche d'oxyde native laissée après l'attaque chimique. Cette procédure d'attaque sèche crée une surface désordonnée riche en îlots d'indium. Il semble que les ions d'Ar^+ arrachent plus facilement les atomes d'indium. Il est important que la couche perturbée ne soit pas trop profonde afin que la diffusion du dopant ne s'étende pas trop profondément. Il serait alors difficile de maintenir une forte concentration de dopant près de l'interface.

3.4 Systèmes métal/InP

3.4.1 Introduction

Les contacts ohmiques réalisés sur l'InP sont en général à base d'or. Le contact est souvent réalisé avec le dépôt d'un alliage d'or. Dans le but de prévenir toutes réactions chimiques avec le milieu extérieur et pour faciliter la connexion avec une source électrique externe, on recouvre le contact d'une couche d'or (100 à 500 nm). De plus, l'or possède une bonne conductivité thermique. C'est une propriété physique importante puisque cela permet d'évacuer rapidement l'énergie thermique générée à la jonction.

L'emploi des contacts à base d'or pose toutefois des problèmes. Dans la gamme des

températures (300°C-450°C) couramment utilisées pour la fabrication des contacts ohmiques, les couches minces d'or forment déjà des composés définis avec le substrat d'InP. La présence d'or à la surface du substrat augmente considérablement la décomposition du substrat d'InP. Le substrat d'InP non-métallisé se décompose à une température de 450 °C. Cela est dû à la diffusion externe du phosphore qui s'évapore. Lorsqu'il y a la présence d'une couche d'or sur la surface, la température de décomposition décroît à 350 °C. Ce processus de décomposition accentué est dû à quelques facteurs. L'or diffuse rapidement et profondément dans l'InP et peut déstabiliser les liens In-P. Mais le processus dominant est basé sur la saturation du mélange Au-In. L'indium s'incorpore dans la couche d'or jusqu'à ce qu'il y ait saturation du mélange. La température eutectique du mélange Au-In est de 451 °C. Plus la température de recuit sera élevée, plus il y aura incorporation d'indium dans la couche d'or. Les pertes de phosphore augmentent avec la quantité d'or déposée. Pour prévenir la décomposition excessive de l'InP, il faut;

(1) réduire la quantité d'or déposée;

(2) utiliser une barrière de diffusion;

(3) effectuer des traitements thermiques à basse température et de courte durée.

Il est préférable, du point de vue de la morphologie de la surface, d'effectuer le recuit d'une structure métallique mince et d'ajouter par la suite une couche épaisse d'or. L'or réagit plus fortement avec l'indium qu'avec le phosphore. Les phases qui peuvent se former sont; $AuIn_2$, Au_3In, Au_4In, Au_9In_4 et Au_2P_3. On peut qualitativement identifier la formation de certaines phases à la variation de couleur de la surface. On associe ainsi la couleur rose à la formation des composés Au_2P_3 et Au_3In. Il semble que la formation du composé Au_2P_3 soit responsable de la dégradation des contacts à base d'or sur InP. Selon Auvray et al. (1985b), la nature du dopant change radicalement l'interaction métallurgique. Par exemple, dans le cas du contact AuGe/n-InP, le germanium modifie profondément l'interaction. Il y a ainsi formation du composé GeP au lieu d'amas d'Au_2P_3. L'or agit comme un donneur profond avec un niveau d'énergie situé à 0,55 eV au-dessous de E_c. On rapporte même la réalisation de contacts ohmiques Au/n-InP (Auvray et al., 1985b) avec une résistance spécifique de $7 \cdot 10^{-5}$ Ω-cm^2. On identifiera, pour chaque type de dopant, la nature des principales phases qui se forment lors de la fabrication du contact. Il faut souligner que les valeurs de r_c en deça de 10^{-6} Ω-cm^2 doivent être considérées avec beaucoup de réserve.

3.4.2 Systèmes métal/n-InP

Le contact ohmique sur n-InP est relativement facile à réaliser. Le germanium, le titane et l'étain sont les éléments dopants que l'on utilise pour réaliser des contacts ohmiques sur n-InP. Le germanium est le dopant qui a été le plus souvent employé. On a directement emprunté, à la technologie du GaAs, le procédé de fabrication du contact allié réalisé au moyen de l'alliage AuGe. Cependant, les contacts à base de germanium posent certains problèmes reliés à de fortes interactions métallurgiques. En effet, la température eutectique peu élevée de l'alliage AuGe (360 °C) et l'intense activité métallurgique qui en découle peut créer une surface assez tourmentée qui peut ne pas convenir lors de la fabrication de contacts de faibles dimensions. C'est la raison principale pour laquelle des contacts à base de titane ont été envisagés. Ces contacts présentent le grand avantage de ne pas être à base d'or. On verra plus loin que les contacts à base de titane comportent plusieurs avantages importants. Toutefois, les contacts AuGe possède la qualité d'être formés à une température relativement basse (360 °C). Les contacts à base d'étain sont aujourd'hui très peu utilisés en raison de la mauvaise morphologie de surface qui les caractérise.

3.4.2.1 Contacts à base de germanium

Le germanium agit comme un dopant amphotère dans l'InP et possède un coefficient de diffusion très faible d'environ 10^{-19} cm^2/s à 400 °C (Auvray, 1985b). L'apport du germanium se fait généralement en utilisant l'alliage eutectique AuGe dont la proportion de germanium en poids est de 12%. Cet alliage comporte les avantages d'avoir un point de fusion peu élevé et d'être constitué de deux éléments dont les points de fusion sont sensiblement les mêmes. On peut également déposer sur la surface une couche de germanium que l'on recouvre ensuite d'or. Dans ce dernier cas, il est préférable de choisir un rapport d'épaisseur Au:Ge de 16:9 qui correspond à l'alliage eutectique. Les structures les plus simples se présentent sous la forme AuGe/n-InP et Au/AuGe/n-InP. On compte plusieurs types de contacts à base de germanium qui contiennent du nickel. Le nickel peut-être utilisé selon deux façons. Tout comme dans le cas du contact n-GaAs, le nickel peut jouer le rôle d'agent mouilleur lorsqu'il est ajouté au germanium et à l'or pour former l'alliage AuGeNi. On choisit alors le rapport massique Au:Ge:Ni de 8:1:1 qui correspond

au mélange eutectique. Le nickel peut également agir comme une barrière de diffusion. Le nickel est alors évaporé selon les séquences suivantes; Ni/AuGe/n-InP ou Ni/Au/Ge/n-InP. Lors du recuit, le germanium a tendance à diffuser vers l'extérieur. Lorsque les atomes de germanium sont arrivés à la barrière de nickel, ils peuvent réagir avec les atomes de nickel ou retraiter vers l'InP. Cependant, il semble que contrairement au contact sur n-GaAs, les contacts Au-Ge-Ni ne montrent pas de région fortement dopée avec le germanium. Ces contacts présentent une meilleure morphologie de surface. Il faut noter qu'il est nécessaire d'ajouter après le recuit une couche d'or pour faciliter la connexion externe et pour améliorer la conductivité électrique du contact. Dunn et Stringfellow (1990) de même que Katz et Pearton (1991) ont rapporté des valeurs de r_c aussi faibles que 10^{-7} Ω-cm^2 qui correspondent à des structures métalliques très différentes. Ces structures sont Au(300)/Ti(50)/Ni(25)/Au(80)/Ge(45)/n-InP et AuGe(300)/n-InP.(1)

3.4.2.2 Contacts à base de titane

Les contacts à base de titane se présentent sous les formes Pt/Ti/n-InP et Au/Pt/Ti/n-InP. Le titane agit comme un état donneur situé à 0,5 eV au-dessous de E_c. La présence de la couche de platine est nécessaire pour éviter l'oxydation du titane; la formation de composés Au-Ti; et la diffusion de l'or dans l'InP. Les contacts à base de titane présentent de nombreux avantages. L'absence d'or à l'interface fait en sorte que les réactions métallurgiques que l'on retrouve dans les contacts à base d'or sont évitées. En effet, ce métal génère très peu de réactions chimiques avec l'InP. Ces contacts présentent une bonne morphologie de surface. Les contacts obtenus sont aussi très stables dans le temps. Cela peut s'expliquer au moyen de considérations thermodynamiques. De plus, le titane a une excellente adhésion sur l'InP. Il faut tout d'abord souligner que ces contacts peuvent présenter un comportement ohmique avant recuit (jusqu'à 5 kA/cm^2). Cela n'est pas le cas des autres dopants. Katz et al. (1990) ont montré que la fabrication des contacts à base de titane sur n-InP peut s'effectuer conjointement avec la formation des contacts ohmiques sur p-$In_{0.53}Ga_{0.47}As$. Les contacts à base de titane sur p-InGaAs s'avèrent de très bonne qualité avec une très faible valeur de r_c. De plus, les deux types de contacts

(1) Les valeurs entre parenthèses sont en nanomètres.

subissent le même traitement thermique optimal. Cela leur confère un grand avantage au niveau de la procédure globale de fabrication du dispositif.

3.4.2.3 Contacts à base d'étain

Les contacts à base d'étain sont aujourd'hui très peu utilisés. Ces contacts présentent des problèmes de morphologie (formation d'îlots en surface, stries) après recuit. On peut toutefois obtenir des résistances spécifiques de l'ordre de 10^{-6} Ω-cm^2 avec ce type de contact (Au/Sn/n-InP; Barnes et Williams, 1981). Ces chercheurs soulignent qu'il est préférable d'avoir un pourcentage d'étain de moins de 5 % en poids si l'on veut obtenir des contacts plus homogènes. Certains ont observé une interdiffusion de l'étain et l'or à température ambiante.

3.4.3 Systèmes métal/p-InP

Les éléments les plus souvent employés comme atomes dopants dans le cas du contact sur p-InP sont le béryllium (Be) et le zinc (Zn). Les contacts réalisés avec le béryllium comportent plusieurs avantages comparativement aux contacts à base de zinc. Parmi les principaux avantages, on note une résistance spécifique de contact plus faible de même qu'une meilleure stabilité thermodynamique. Cependant, le béryllium a un grand inconvénient : c'est un élément très toxique. Le zinc l'est aussi, mais, à un degré beaucoup moindre. C'est la raison pour laquelle les contacts à base de zinc sont les plus souvent utilisés. D'autres éléments tels le magnésium (Mg), le chrome (Cr), le titane (Ti) et le manganèse (Mn) ont aussi été utilisés comme dopants, mais sans succès.

3.4.3.1 Contacts à base de zinc

Les contacts à base de zinc peuvent être réalisés de deux façons, suivant que l'apport du zinc se fasse au moyen d'une source de zinc, ou bien, à partir d'un alliage AuZn. Les contacts à base de zinc présentent plusieurs inconvénients. Les problèmes que cela crée sont principalement causés par la pression de vapeur élevée et la faible température de fusion du zinc. Les problèmes sont;

(1) l'évaporation de l'alliage AuZn s'accompagne de l'évaporation préférentielle du

zinc par rapport à l'or. Cela a deux conséquences :

(a) les dépôts d'AuZn ne sont pas homogènes;

(b) puisque le zinc se dépose en premier lieu, la couche déposée adhère mal au substrat du fait que le coefficient d'adhésion du zinc sur l'InP est très faible;

(2) la réévaporation du zinc durant le recuit du contact;

(3) le taux de déposition est difficile à contrôler;

(4) la contamination de l'évaporateur.

Du point de vue thermodynamique, les contacts à base de zinc sont peu stables (réactions à température ambiante pour former AuZn). De plus, la diffusion rapide du zinc dans l'InP, peut causer le déplacement de la jonction. Le zinc possède un coefficient de diffusion relativement élevé de 10^{-11} cm^2/s à 400 °C (Auvray, 1985b). Tous ces inconvénients font également en sorte que la reproductibilité des contacts s'avère difficile. Pour remédier au problème d'adhésion, on peut évaporer une mince couche d'or d'une épaisseur d'environ 10 nm directement sur le substrat avant de déposer le zinc. On peut également résoudre le problème en évaporant un alliage AuZn dont le pourcentage en poids de zinc se situe entre 5 et 12%. L'alliage AuZn qui contient un pourcentage massique de zinc de 10% correspond à la phase Au_3Zn. L'évaporation de l'alliage AuZn pose cependant un problème. En effet, comme il a été mentionné précédemment, l'évaporation préférentielle du zinc peut générer la formation d'une couche non-homogène qui adhère mal au substrat. Toutefois, des études récentes (Malina et al., 1994b) ont montré qu'un taux d'évaporation très élevé (15-25 nm/s) pouvait améliorer grandement les propriétés des contacts. Premièrement, les particules évaporées sont plus volumineuses et homogènes. La couche déposée est donc ainsi plus uniforme et contient plus d'or. La couche déposée adhère ainsi beaucoup mieux à l'InP et est plus représentative de l'alliage évaporé. Encore plus important, est le fait que le haut taux de déposition influence dramatiquement les caractéristiques électriques du contact. Malina et al. (1994b) en arrivent à la conclusion que le taux de déposition est le facteur le plus important qui détermine l'ohmicité ou la non-ohmicité du contact. Ils ont aussi trouvé que la température du substrat (30°C-50°C) durant la déposition était un paramètre très important. Même les contacts déposés avec un faible taux de déposition résultaient en des contacts ohmiques ($7 \cdot 10^{-4}$ Ω-cm^2).

Nakahara et al. (1984) affirment qu'une simple métallisation de zinc ne permet pas d'obtenir un contact ohmique. Il faut nécessairement ajouter une couche d'or. Dans le cas

de la structure Zn/p-InP, ils ont attribué à la formation du composé non-métallique II-V Zn_3P_2 (E_g = 1.5 eV) le comportement non-ohmique du contact. Oparaku et al. (1990) font remarquer que la présence abondante de composés Au_3In_2 est une condition nécessaire pour l'obtention de contacts ohmiques de faible résistance. Kaminska et al. (1986) n'ont pas été en mesure d'identifier de couche p^+ dans le cas du contact Au/Zn/Au/p-InP. On emploie souvent une barrière de nickel pour empêcher la diffusion externe du zinc lors du recuit. Verlangieri et al. (1991) ont obtenu une valeur très faible de r_c de $9{,}5 \cdot 10^{-7}$ Ω-cm^2 avec la structure Au(150)/Ni(20)/Au(15)/Zn(12)/Au(15)/p-InP qui a été recuite à une température relativement élevée de 475 °C durant 1 minute. Généralement, les valeurs rapportées se situent autour de 10^{-4} Ω-cm^2.

3.4.3.2 Contacts à base de béryllium

Les contacts à base de béryllium sont généralement fabriqués avec un alliage AuBe dont la concentration massique en béryllium varie de 1 à 3%. Le béryllium est le dopant accepteur le moins profond. Le coefficient de diffusion du béryllium dans l'InP à 400 °C est de 10^{-11} cm^2/s (Auvray, 1985b). Contrairement aux contacts à base de zinc, les contacts à base de béryllium sont plus reproductibles. L'évaporation de l'alliage AuBe ne pose aucun problème du fait que les pressions de vapeur de l'or et du béryllium sont sensiblement les mêmes. Valois et Robinson (1982) ont suggéré que le contact ohmique AuBe/p-InP résultait de la formation d'îlots d'Au_2P_3 entourés d'Au_3In et/ou d'Au_9In_4. Selon eux, les pavés d'Au_2P_3 s'avancent dans l'InP et le dopant s'agglomère sous ces îlots. Le courant circule alors dans ces petites régions localisées fort dopées tel que le suggère le modèle de Braslau. Ils ont évalué le diamètre des pavés d'Au_2P_3 à environ 1 µm. L'emploi d'une barrière de palladium (Pd) ou chrome contre la diffusion externe du phosphore se révèle efficace. Temkin et al. (1980) ont déposé la barrière de palladium directement sur la surface. Cela s'est fait au détriment d'une augmentation de r_c. La plus basse valeur de r_c rapportée dans la littérature est de $5 \cdot 10^{-5}$ Ω-cm^2 (Hasenberg et Garmire, 1986). Elle correspond à la structure Au(100)/Cr(20)/AuBe(80)/p-InP réalisée avec un alliage contenant 3% de béryllium et recuite à 410 °C durant trois minutes.

CHAPITRE 4

Expérimentation

4.1 Introduction

Les expériences réalisées au cours de ce projet avaient principalement pour but d'étudier la caractéristique r_c en fonction des paramètres tels la température et la durée de recuit, la solution d'attaque chimique de même que la nature et l'épaisseur des couches métalliques déposées. Parce que les contacts ohmiques sur p-InP sont plus difficiles à réaliser que les contacts sur n-InP, ils constituent l'objet d'étude principal de ce projet. Nous avons donc concentré davantage nos efforts sur le substrat p-InP et réalisé ainsi un plus grand nombre d'expériences sur ce type de substrat.

On présente dans ce chapitre les différentes techniques de fabrication, les méthodes de caractérisation de même que les procédures expérimentales que nous avons choisies. On présente ensuite les principaux résultats de même qu'une analyse et une discussion des résultats.

4.2 Choix des matériaux, techniques et procédés

4.2.1 Choix des matériaux

Toutes les expériences effectuées ont été réalisées sur des gaufres d'InP (100) provenant de la compagnie Sumitomo Electric. Les données relatives aux gaufres de type n sont les suivantes;

- Surface polie (100)
- $\rho = 6{,}6\text{-}8{,}3 \cdot 10^{-4}$ Ω-cm
- $n = 5{,}1\text{-}7{,}1 \cdot 10^{18}$ cm^{-3} (S)
- Epaisseur = 315 µm

Dans le cas du substrat de type p, la concentration était de $p = 3 \cdot 10^{18}$ cm^{-3} (Zn) et la résistivité, de $6{,}6 \cdot 10^{-2}$ Ω-cm. Il est important de signaler que, contrairement aux substrats de type n, la surface des gaufres de type p n'était pas polie. Les épaisseurs des substrats de type p après polissage se situaient autour de 390 µm. Nous n'avons pas utilisé, au cours de ce projet, d'échantillons avec couche épitaxiale ou implantée.

Nous avons choisi de réaliser, dans le cas du substrat de type n, des contacts à base de germanium (Ge). Les contacts à base de germanium ont été réalisés avec un alliage AuGe dont le pourcentage massique de germanium était de 12%. Nous avons choisi de réaliser le contact sur n-InP avec cet alliage parce que les structures à base d'AuGe donnent de faibles valeurs de r_c ($\approx 10^{-6}\ \Omega$-cm^2), sont faciles à réaliser et peuvent être fabriqués à une température relativement basse (≈360 °C).

Dans le cas du substrat de type p, notre choix s'est tout d'abord limité à utiliser le zinc comme dopant puisque nous avons été dans l'obligation, pour des fins sécuritaires, d'écarter le choix du béryllium comme dopant. La réalisation des contacts à base de zinc s'est faite au moyen de deux sources différentes de zinc. On a utilisé, lors de nos premières expériences, une source pure de zinc, alors que dans la seconde partie, on a employé un alliage AuZn contenant un pourcentage massique de zinc de 10%. Nous avons, par la suite, tenté de réaliser des contacts à base de titane. Voici la liste des sources métalliques que nous avons utilisées;

(1)	Au(99.99)	:	grains (≈ 0,14 g)	Pure Tech
(2)	AuGe(99.99)	:	grains (≈ 0,8 g)	Princeton
(3)	AuZn(99.999)	:	grains (≈ 0,3 g)	ESPI
(4)	Pt(99.95)	:	fil ϕ = 1,5 mm	Johnson-Matthey
(5)	Ti(99.98)	:	fil ϕ = 0,25 mm	Johnson-Matthey
(6)	Zn(99.99)	:	grains (≈ 0,12 g)	Johnson-Matthey

4.2.2 Choix et description des techniques employées

Le choix des méthodes et techniques de fabrication que nous avons utilisées dépendait en majeure partie des moyens dont nous disposions au département. Toutes les procédures expérimentales ont été élaborées en fonction du procédé du lift-off. C'est le procédé que l'on utilise usuellement lors de la fabrication des contacts ohmiques.

La première étape consistait à cliver les gaufres d'InP (100) de 50 mm de diamètre en pièces de 1 cm par 1 cm. Le polissage mécano-chimique des échantillons de type p était effectué manuellement sur un disque recouvert d'un papier de polissage sur lequel on versait une solution de brome-méthanol dont la concentration en brome se situait entre 0,5 et 2% en volume. Nous avons, au cours de nos manipulations, utilisé deux types de papier. Le premier était de marque Pan-W alors que le second papier provenait de la

compagnie Buehler et était de marque Texmet. On compare à la figure 4.1, les topographies de deux différentes surfaces d'InP prises au moyen de la technique de microscopie par force atomique. Les mesures topographiques montrent que la rugosité de la surface des substrats de type n polis industriellement (Ra = 0.32 nm) est environ deux fois moindre que la rugosité des échantillons de type p que nous avons polis (Ra = 0.74 nm).

La nature du masque de motifs que l'on déposait sur le substrat dépendait de la technique de déposition utilisée. La déposition des métaux avec points de fusion élevés nécessite l'emploi d'un masque de nature autre que la photorésine lorsque celle-ci n'est pas refroidie. Ainsi, la fabrication des structures métalliques constituées de métaux avec points de fusion élevés (Pt, Ti), réalisées avec la technique d'évaporation par faisceau électronique, nécessitait la fabrication d'un masque de SiO_2. Le masque de SiO_2 a été réalisé au moyen de la technique de "*spin-on-glass*" en utilisant la solution Liquicoat Si ZLI-2132 de Merck. La couche de SiO_2 était ensuite recuite à deux reprises à des températures de 100 et 400 °C durant 15 minutes. Les structures réalisées avec des métaux et alliages évaporés par effet Joule permettaient la simple formation d'un masque de photorésine de type positive. Les photorésines que nous avons employées étaient les photorésines S1400-17 de Shipley et HPR-504 de OCG. La photolithographie UV des échantillons était effectuée avec un appareil Karl Suss MJB-3 et un masque de chrome. Dépendamment de la photorésine utilisée, le développement des motifs était réalisé avec les développeurs 354 (Shipley) ou HPRD-419 (OCG).

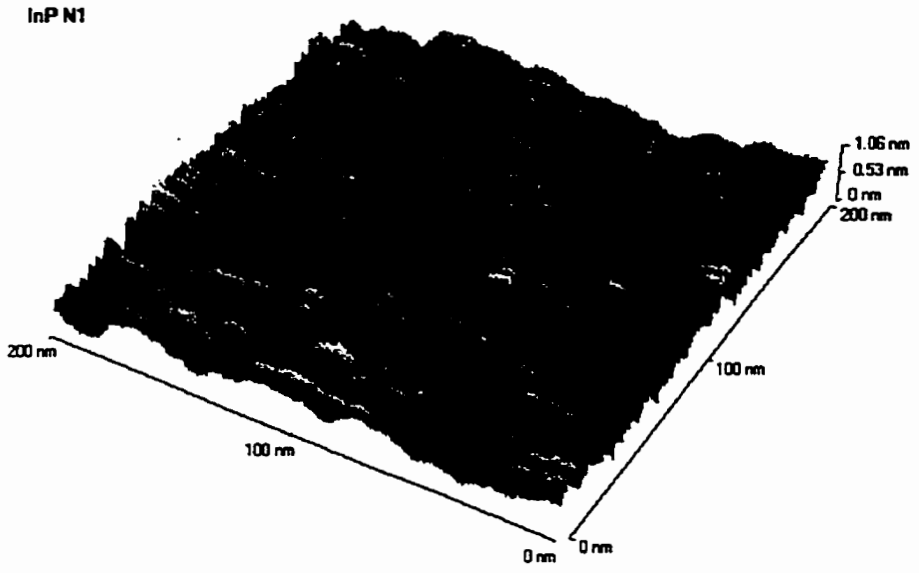
Nous avons utilisé, au cours de nos expériences, différentes solutions d'attaque chimique pour préparer la surface des substrats avant les métallisations. Ce sont;

(1) HF (49%)

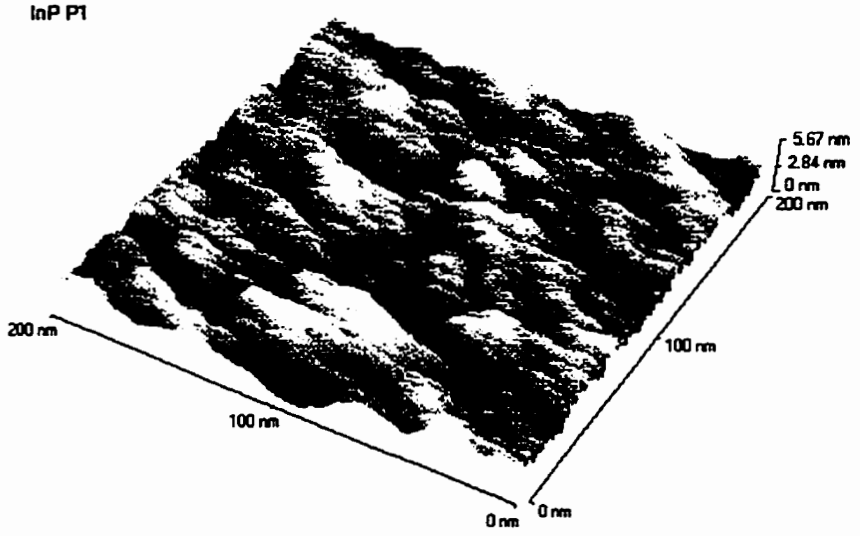
(2) 1 HF : 10 H_2O

(3) 3 H_2SO_4 : 1 H_2O_2 : 1 H_2O

Les métallisations des substrats ont été réalisées au moyen de différents évaporateurs. Le vide secondaire ($\approx 10^{-6}$ Torr) était atteint, dans tous les cas, au moyen d'une pompe à diffusion et d'un piège à azote. La majeure partie de nos expériences ont été réalisées avec un évaporateur Edwards E1204 que nous avons reconditionné. Cet évaporateur peut disposer de trois sources chauffées par effet Joule. Cependant, contrairement aux autres, cet évaporateur n'est pas muni d'un dispositif anti-reflux d'huiles pour contrer les remontées de vapeur provenant de la pompe mécanique. Cet évaporateur était situé dans



(a) Surface n-InP polie industriellement.



(b) Surface p-InP polie mécano-chimiquement au brome-méthanol.

Figure 4.1 Topographies des surfaces n- et p-InP.

un endroit dont l'air n'était pas filtré. Trois autres évaporateurs munis de sources chauffées par effet Joule étaient situés dans une salle grise. Nous disposions également d'un évaporateur Edwards muni d'un dispositif d'évaporation par faisceau électronique situé dans une salle propre, et avec lequel, nous pouvions évaporer jusqu'à six différentes sources métalliques. On visait, sauf dans le cas de l'alliage AuZn, à obtenir un taux d'évaporation de l'ordre de 8 à 10 Å/sec dans le but de ne pas trop chauffer la photorésine. On visait également, dans la mesure du possible, à ne pas déposer en tout, plus de 250 nm afin de réduire les réactions métallurgiques Au/InP et à faciliter le lift-off. Nous avons utilisé différents types de bateaux. Le bateau qui s'est révélé le plus efficace est un bateau acheté de la compagnie K.J.Lesker dont le numéro de modèle est EVS8A005W. Ce bateau de tungstène comporte deux avantages. Premièrement, sa faible section transversale (0.127 mm x 12.7 mm) fait en sorte qu'il est plus résistif et qu'il nécessite ainsi moins de courant que les autres, et deuxièment, sa cavité circulaire médiane de 12 mm de diamètre ne requiert qu'une faible quantité de métal lors de chaque évaporation.

Le lift-off était réalisé avec un bain ultrasonique Cole Parmer 8850. Le bain était rempli avec un litre d'eau désionisée dans lequel on déposait un bécher de 250 ml rempli de 200 ml d'acétone. L'échantillon était déposé directement dans le fond du bécher. Une durée d'agitation de deux minutes était, en général, suffisante pour compléter le lift-off. Dans le cas où le lift-off s'avère difficile, il faut réduire la quantité d'acétone. Une fois le lift-off réussi, on nettoie l'échantillon avec des solutions chaudes d'acétone, d'iso-propanol et de méthanol durant 5 minutes chacune.

Les recuits des contacts ont été réalisés à l'aide de deux fours à recuit. Le premier four utilisé est un four à recuit rapide de marque AG Associates Heatpulse 410. L'échantillon à recuire est placé sur une gaufre de silicium (ϕ = 50 mm). Un thermocouple de type K (chrome-alumel) est placé près de la gaufre à la même hauteur que l'échantillon. Une plaque de quartz qui est supportée par un plateau, également en quartz, est placée au-dessus de la gaufre et du thermocouple. Les recuits s'effectuent sous le balayage d'un mélange de N_2-H_2 (90:10) avec un débit de 2l/min. On nettoie, avant chaque expérience, la plaque et la gaufre de silicium selon la procédure suivante :

A. Nettoyage de la plaque de protection

(1) Trempage dans une solution d'eau régale (1 HCl : 1 HNO_3) durant 5 minutes;

(2) Rinçage à l'eau désionisée et séchage avec de l'azote sec;

(3) Chauffage dans un four à 120 °C durant 20 minutes pour éliminer toutes traces d'eau.

B. Nettoyage de la plaque de silicium

(1) Dégraissage avec trichloroéthane (1,1,1), acétone, iso-propanol et méthanol chaud durant 5 minutes;

(2) Attaque avec la solution 1 HF : 10 H_2O durant 1 minute;

(3) Rinçage à l'eau désionisée et séchage avec de l'azote sec;

(4) Chauffage dans un four à 120 °C durant 20 minutes pour éliminer toutes traces d'eau.

Le second four, que nous avons fabriqué, est constitué d'un tube de quartz de 47 mm de diamètre et de 305 mm de longueur dans lequel repose une plaque de graphite de 76 mm de longueur, 38 mm de largeur et 4 mm d'épaisseur. Le volume du tube est de 0.53 litre. Ce four est illustré à la figure 4.2. Un thermocouple de type K est inséré jusqu'à mi-

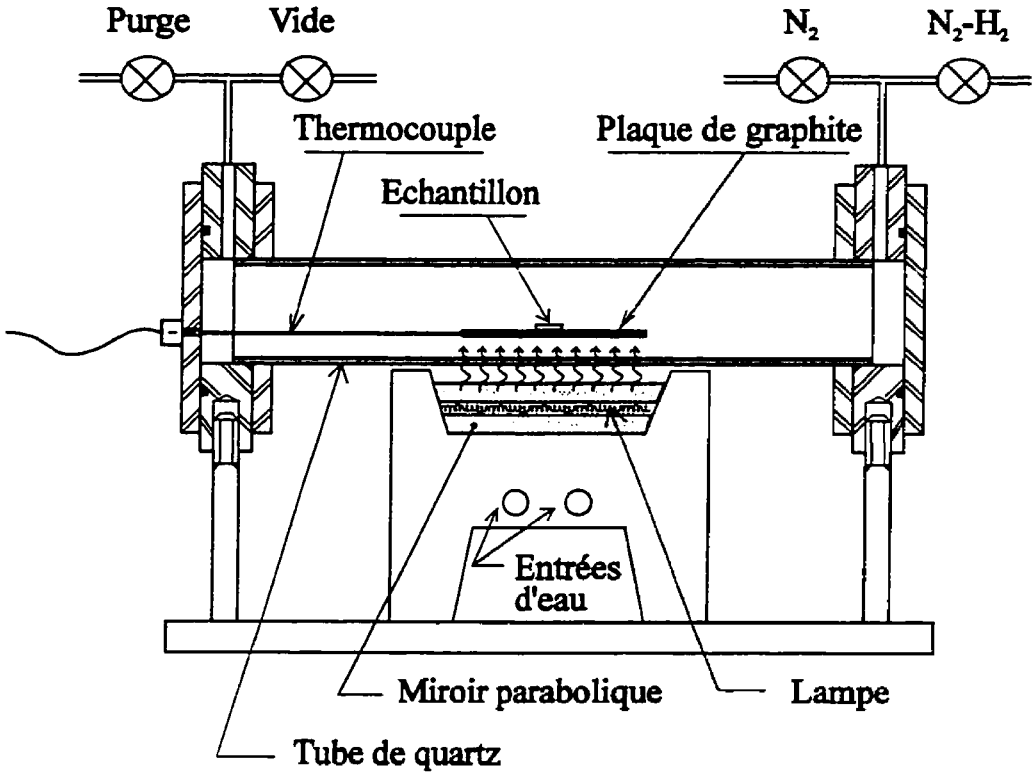


Figure 4.2 Four à recuit avec tube de quartz et lampe infrarouge.

longueur dans la plaque de graphite. Ce thermocouple est relié à un contrôleur de température REX-P9 (RKC Instruments) qui contrôle la puissance d'une lampe infrarouge disposée sur un bâti muni d'un miroir parabolique refroidi à l'eau. L'étanchéité du tube est réalisée au moyen de quatre joints de viton.

Avant chaque expérience, on chauffe la plaque de graphite à une température de 450 ° C durant 30 minutes sous un flux d'azote. Après avoir inséré un échantillon, on fait un vide grossier, puis, on fait entrer de l'azote. On effectue cette séquence d'opération à quatre reprises. On fait ensuite circuler de l'azote durant 5 minutes, puis, on effectue le recuit sous le balayage du mélange de N_2-H_2 (90:10) avec un débit de 2 l/min.

Pour bien contrôler les courbes de température, les cycles de température débutent tous par une montée de température jusqu'à un plateau que l'on a fixé à 60 °C. On obtient, de cette façon, des courbes T(t) très reproductibles (± 1 °C). Ces courbes sont données à l'annexe D. L'établissement du plateau de température est d'une durée de cinq minutes. Le mélange de N_2-H_2 (90:10) circule donc, avec un débit de 2 l/min, pendant cinq minutes, avant que le recuit débute. Il faut souligner qu'aucun des deux fours utilisés ne permet une descente rapide de température. Après avoir terminé, on laisse l'intérieur du tube sous une pression positive de 5 psi pour prévenir la contamination de la chambre.

4.2.3 Descriptions des procédures expérimentales

Nous avons utilisé, en tout, deux procédures expérimentales. Ces deux procédures se distinguent seulement qu'au niveau de l'étape de la formation du masque. Il est à noter que l'étape du polissage mécano-chimique s'applique uniquement aux échantillons de type p. Voici le sommaire de chacune de ces procédures.

A. Formation des contacts réalisés avec des métaux avec points de fusion bas (Au - Zn - AuGe - AuZn)

(1) Dégraissage avec trichloroéthane (1,1,1), acétone, iso-propanol et méthanol chaud durant 5 minutes

(2) Polissage mécano-chimique au brome-méthanol (Br_2-1% vol)

(3) Dégraissage avec trichloroéthane (1,1,1), acétone, iso-propanol et méthanol chaud durant 5 minutes

(4) Séchage des échantillons à T = 120 °C durant 25 minutes

(5) Formation du masque de résine
  (a) Dépôt de la photorésine HPR-504 (OCG) :
    ω_1 = 500 RPM ; t_1 = 0 - 5 secondes
    ω_2 = 4000 RPM ; t_2 = 5 - 30 secondes
  (b) Chauffage doux (*"soft-bake"*) : T = 105 ± 5 °C durant 25 minutes
  (c) Photholithographie : exposition durant 25 secondes
  (d) Développement des motifs avec une solution de 250 ml de développeur HPRD-419 durant 50 secondes
  (e) Chauffage fort (*"hard-bake"*) : T = 120 ± 5 °C durant 25 minutes
(6) Attaque chimique de l'InP
(7) Déposition métallique par effet Joule
(8) Lift-off
(9) Recuit

B. Formation des contacts réalisés avec des métaux avec points de fusion élevés (Pt - Ti)

(1) Dégraissage avec trichloroéthane (1,1,1), acétone, iso-propanol et méthanol chaud durant 5 minutes
(2) Polissage mécano-chimique au brome-méthanol (Br_2-1% vol)
(3) Dégraissage avec trichloroéthane (1,1,1), acétone, iso-propanol et méthanol chaud durant 5 minutes
(4) Séchage des échantillons à T = 120 °C durant 25 minutes
(5) Formation du masque de SiO_2 de marque Liquicoat Si ZLI 2132 (Merck)
  A. (a) Dépôt d'une couche de SiO_2 liquide :
    ω = 4000 RPM ; t = 1 minute; épaisseur ≈ 350 nm
  (b) Chauffage à T = 100 °C sous air ambiant durant 15 minutes
  (c) Chauffage à T = 400 °C sous N_2 durant 15 minutes
  B. (a) Dépôt de la photorésine HPR-504 (OCG) :
    ω_1 = 500 RPM ; t_1 = 0 - 5 secondes
    ω_2 = 4000 RPM ; t_2 = 5 - 30 secondes
  (b) Chauffage doux (*"soft-bake"*) : T = 105 ± 5 °C durant 25 minutes
  (c) Photholithographie : exposition durant 25 secondes
  (d) Développement des motifs avec une solution de 250 ml de développeur

HPRD-419 durant 50 secondes

(e) Chauffage fort ("*hard-bake*") : T = 120 ± 5 °C durant 25 minutes

C. Ouverture des motifs dans le SiO_2 avec la solution 1 NH_4OH : 1 HF : 198 H_2O durant 15 secondes

(6) Attaque chimique de l'InP

(7) Déposition métallique par évaporation par faisceau électronique

(8) Lift-off de la couche de résine

(9) Recuit

4.3 Choix des méthodes de caractérisation électrique

Nous n'avons réalisé des contacts ohmiques que sur des substrats entièrement dopés. Nous avions donc le choix entre deux méthodes pour déterminer la caractéristique r_c. Nous avons choisi la méthode des quatre pointes (Kuphal, 1981) plutôt que la méthode de Cox et Strack parce que cette dernière nécessite la métallisation des deux faces du substrat.

Nous avons aussi tracé, pour caractériser les contacts non-linéaires, des courbes I-V qui correspondent à la caractérisation électrique de couples de plots voisins.

4.3.1 Description du montage de mesure

Le montage de caractérisation électrique comprend principalement une source de courant Keithley 224 et un multimètre Keithley 196. La source de courant peut débiter un courant maximal de 100 mA. Le courant émis est précis à ± 0,1 mA près. Chacun des instruments est relié à deux porte-sondes Karl Suss qui maintiennent, chacun, une pointe de tungstène. L'échantillon est déposé sur une plaque de téflon dans le but de l'isoler électriquement. Les mesures électriques sont prises à la température et lumière ambiante. La configuration des dispositifs de mesure consiste en des plots de 100 µm de diamètre distants de 300 µm. Nous avons sept rangées de plots.

4.3.2 Calcul de r_c et Δr_c

Le calcul de r_c se fera ici en négligeant l'effet de la résistance d'étalement R_s (On présume que les valeurs de y sont inférieures à 1. Il est à noter, cependant, que l'on tiendra compte de R_s dans le calcul de l'incertitude sur r_c). On approxime ainsi, l'expression 2.13 par la formule;

$$r_c = \frac{A}{I_{ad}} \left(V_{ab} - V_{bc} \frac{\ln[3(s/\phi) - 1/2]}{2\ln 2} \right) \qquad (4.1)$$

En remplaçant les paramètres de cette équation par les valeurs suivantes;

$\phi = 100\ \mu m$ $\qquad$ $A = 7{,}85 \cdot 10^{-5}\ cm^2$

$s = 300\ \mu m$ $\qquad$ $I_{ad} = 10\ mA$;

on obtient la formule;

$$r_c = 7{,}85 \cdot 10^{-3} \left(V_{ab} - 1{,}54 \cdot V_{bc} \right) \quad cm^2 \cdot A^{-1} \qquad (4.2)$$

où V_{ab} et V_{bc} sont donnés en mV.

Le calcul de Δr_c dépend, en théorie, de plusieurs paramètres et grandeurs. Notre calcul montre que l'incertitude Δr_c est principalement due à trois termes. En différenciant l'expression 4.1 et en ne retenant que les trois termes principaux, on approxime Δr_c par l'expression;

$$\Delta r_c \approx \frac{V_{ab}}{I_{ad}} |\Delta A| + \frac{A}{I_{ad}} |\Delta V_{ab}| + \frac{A}{I_{ad}} \frac{\ln[3(s/\phi) - 1/2]}{2\ln 2} |\Delta V_{bc}| \qquad (4.3)$$

Cette expression de Δr_c ne comprend pas, toutefois, l'effet de la résistance d'étalement. On tiendra compte de R_s ultérieurement. Si le contact est caractérisé par une relation I-V linéaire, r_c et Δr_c sont indépendants de I_{ad}. Le calcul de Δr_c ne dépend, dans notre cas, que du type de substrat puisque les paramètres géométriques (ϕ = 100 µm, s = 300 µm) sont les mêmes pour chaque mesure. Nous avons effectué les calculs de Δr_c pour une intensité de courant de 10 mA. On doit ajouter à ces paramètres, la valeur $\Delta A \approx 1{,}5 \cdot 10^{-6}$ cm^2 qui correspond à une incertitude de 2 µm sur le diamètre ϕ.

4.3.2.1 Substrat de type n

Le substrat de type n est caractérisé par une résistivité de $7 \cdot 10^{-4}\ \Omega$-cm et une épaisseur de 315 µm. Pour un courant de 10 mA, les valeurs des tensions mesurées sont de l'ordre de;

$$V_{ab} \approx 300\ \mu V; \qquad \Delta V_{ab} \approx 30\ \mu V; \qquad \Delta V_{bc} \approx 5\ \mu V.$$

En entrant, ces valeurs dans l'équation 4.3, on obtient;

$$\Delta r_c \approx 9 \cdot 10^{-8}\ \Omega\text{-cm}^2 + 2{,}4 \cdot 10^{-7}\ \Omega\text{-cm}^2 + 6 \cdot 10^{-8}\ \Omega\text{-cm}^2$$
$$\approx 4 \cdot 10^{-7}\ \Omega\text{-cm}^2$$

Selon Kuphal (1981), pour $y \leq 1$, $R_s \leq 0{,}12\ R_c$. Vérifions la valeur de y en utilisant l'expression 2.16;

$$y = \frac{\rho \phi^2}{4 r_c t} \qquad (2.16)$$

En posant r_c égale à $10^{-6}\ \Omega$-cm^2, on obtient;

$$y = \frac{(7 \cdot 10^{-4}\Omega - \text{cm})(0{,}01\ \text{cm})^2}{4(10^{-6}\Omega - \text{cm}^2)(0{,}0315\ \text{cm})} \approx 0{,}56$$

On doit donc ajouter une erreur supplémentaire de 10%, soit $(\Delta r_c)_{étal} \approx 10^{-1} r_c \approx 10^{-7}\ \Omega$-cm^2. L'erreur totale Δr_c est donc de $5 \cdot 10^{-7}\ \Omega$-cm^2. On a ainsi un pourcentage d'erreur de 50% sur r_c.

4.3.2.2 Substrat de type p

Pour un courant de 10 mA, les valeurs des tensions mesurées sont de l'ordre de;

$$V_{ab} \approx 35\ \text{mV}; \qquad \Delta V_{ab} \approx 8\ \text{mV}; \qquad \Delta V_{bc} \approx 22\ \mu V.$$

En entrant, ces valeurs dans l'équation 4.3, on obtient;

$$\Delta r_c \approx 5{,}3 \cdot 10^{-6}\ \Omega\text{-cm}^2 + 6{,}4 \cdot 10^{-5}\ \Omega\text{-cm}^2$$
$$\approx 7 \cdot 10^{-5}\ \Omega\text{-cm}^2$$

Dans le cas du substrat de type p, on s'attend à obtenir une valeur de r_c de $10^{-4}\ \Omega\text{-cm}^2$. En combinant cette valeur avec les valeurs de résistivité $6{,}6\cdot10^{-2}\ \Omega$-cm et d'épaisseur 0,0390 cm, on a une valeur de y égale à;

$$y = \frac{(6{,}6\cdot10^{-2}\Omega-\text{cm})(0{,}01\ \text{cm})^2}{4(10^{-4}\Omega-\text{cm}^2)(0{,}039\ \text{cm})} \approx 0{,}42$$

On rajoutant l'erreur due à l'effet d'étalement, soit $(\Delta r_c)_{étal} \approx 10^{-1} r_c \approx 10^{-5}\ \Omega\text{-cm}^2$, on a une erreur totale Δr_c de $8\cdot10^{-5}\ \Omega\text{-cm}^2$. On obtient, dans ce cas-ci, un pourcentage d'erreur de 80% sur r_c.

4.4 Démarche expérimentale

Dans le but de tester les différentes techniques et méthodes choisies, nous avons choisi de réaliser quelques expériences sur le substrat de type n. Nous avions alors choisi de réaliser la structure Au/AuGe/n-InP. Nous avons réussi, lors de ces premières expériences, à obtenir des contacts ohmiques de faible résistance. Nous avons alors décidé d'entreprendre nos expériences sur le substrat de type p parce que la réalisation de contacts ohmiques sur ce matériau s'avère beaucoup plus ardue que la réalisation des contacts sur n-InP.

Nous avons alors effectué une première série d'expériences qui consistait en la réalisation de contacts à partir d'une source pure de zinc. Nous avions choisi ce type de source pour éviter les problèmes de non-reproductibilité liés à l'évaporation fractionnée de l'alliage AuZn. Nous avons réalisé les structures Au/Zn/Au/p-InP et Au/Zn/p-InP. Les quatre expériences effectuées n'ont donné aucun résultat valable. Nous avons dû interrompre cette série d'expériences parce que l'évaporateur destiné à l'évaporation du zinc est tombé en panne. Nous avons ensuite tenté de réaliser des contacts à base de titane au moyen de la structure Au/Pt/Ti/p-InP, mais encore là, nos expériences se sont avérées infructueuses. Suite à la lecture d'un article de Katz et al. (1992) faisant état de l'impossibilité de réaliser un contact ohmique avec cette structure, nous avons abandonné ce type de contact. Deux articles de Malina et al. (1994) font état de l'influence considérable du taux de déposition de l'alliage AuZn sur la valeur de la résistance spécifique de contact.

Nous avonc donc choisi de réaliser des contacts avec l'alliage AuZn. Cependant, avant d'effectuer ces expériences, nous avons repris nos manipulations sur le substrat de type n. Toutes les expériences étant effectuées dans le même évaporateur, il était préférable de réaliser les manipulations sur les échantillons de type n afin d'éviter les problèmes de contamination reliés au zinc. La réalisation des contacts sur le substrat de type n n'a posé aucun problème.

Bien que nous ayons réussi un contact ohmique, les contacts AuZn/p-InP ne se sont pas avérés suffisamment reproductibles. Nous avons alors tenté de réaliser des contacts selon la structure AuZn/Au/p-InP.

4.5 Résultats expérimentaux sur n-InP

Nous avons réalisé, dans le cas du substrat de type n, qu'un seul type de structure, soit la structure Au(100)/AuGe(100)/n-InP. Tous les contacts fabriqués avec l'alliage AuGe ont résulté en des contacts ohmiques avec de faibles valeurs de r_c de l'ordre de 10^{-6} Ω-cm^2. Cela montre bien à quel point il est facile de réaliser une jonction ohmique sur le substrat de type n. L'obtention de contacts ohmiques à partir d'échantillons n'ayant pas subit de recuit illustre très bien ce fait. Ces contacts exhibent des résistances spécifiques de contact, à peine trois à neuf fois plus grandes que les contacts les moins résistifs.

Les valeurs de r_c varient de 1,0 à $8{,}5 \cdot 10^{-6}$ Ω-cm^2. La plus faible valeur de r_c a été obtenue pour le contact déposé sur une surface nettoyée chimiquement au HF et recuit à une température de 370 °C durant deux minutes. Le tableau 4.1 montre tous les résultats obtenus sur le substrat de type n. Les valeurs entre parenthèses indiquent l'épaisseur des couches métalliques. Soulignons que l'incertitude sur r_c est, dans chacun des cas, égale à $5 \cdot 10^{-7}$ Ω-cm^2. On observe, dans tous les cas, qu'une augmentation de la température et de la durée de recuit cause une diminution de r_c. Les plus faibles valeurs de r_c ont été obtenues avec des échantillons dont la surface a été attaquée au HF alors que les contacts réalisés sur une surface attaquée avec la solution $3H_2SO_4$: $1H_2O_2$: $1H_2O$ exhibent les résistances de contact les plus grandes. Pour les contacts fabriqués sur des surfaces attaquées avec la solution $3H_2SO_4$: $1H_2O_2$: $1H_2O$, on note très peu d'influence de la température de recuit sur la valeur de r_c. Dans le cas où l'on utilise des solutions d'attaque à base de HF, les contacts recuits à 370 °C sont approximativement deux fois moins résistifs que ceux recuits à 350 °C.

Groupe A - Attaque chimique au HF durant une minute

Échantillon	Traitement thermique	$\langle V \rangle_{ab}$(mV)	$\langle V \rangle_{bc}$(mV)	$r_c(\Omega\text{-cm}^2)$
N-1	Aucun recuit	0,925	0,079	$6{,}3\cdot10^{-6}$
N-2	T = 350 °C, t = 15 sec	0,448	0,075	$2{,}6\cdot10^{-6}$
N-3	T = 350 °C, t = 2 min	0,256	0,068	$1{,}2\cdot10^{-6}$
N-4	T = 370 °C, t = 15 sec	0,258	0,072	$1{,}2\cdot10^{-6}$
N-5	T = 370 °C, t = 2 min	0,239	0,070	$1{,}0\cdot10^{-6}$

Groupe B - Attaque chimique avec la solution 1HF : $10H_2O$ durant une minute

Échantillon	Traitement thermique	$\langle V \rangle_{ab}$(mV)	$\langle V \rangle_{bc}$(mV)	$r_c(\Omega\text{-cm}^2)$
N-6	Aucun recuit	0,829	0,066	$5{,}7\cdot10^{-6}$
N-7	T = 350 °C, t = 15 sec	0,636	0,071	$4{,}1\cdot10^{-6}$
N-8	T = 350 °C, t = 2 min	0,493	0,076	$3{,}0\cdot10^{-6}$
N-9	T = 370 °C, t = 15 sec	0,422	0,074	$2{,}4\cdot10^{-6}$
N-10	T = 370 °C, t = 2 min	0,293	0,071	$1{,}4\cdot10^{-6}$

Groupe C - Attaque chimique avec la solution $3H_2SO_4$:$1H_2O_2$:$1H_2O$ durant une minute

Échantillon	Traitement thermique	$\langle V \rangle_{ab}$(mV)	$\langle V \rangle_{bc}$(mV)	$r_c(\Omega\text{-cm}^2)$
N-11	Aucun recuit	1,192	0,072	$8{,}5\cdot10^{-6}$
N-12	T = 350 °C, t = 2 min	0,464	0,074	$2{,}7\cdot10^{-6}$
N-13	T = 370 °C, t = 2 min	0,455	0,090	$2{,}5\cdot10^{-6}$

Tableau 4.1 Résultats expérimentaux obtenus avec la structure Au/AuGe/n-InP.

On montre à la figure 4.3, la courbe I-V relative à deux contacts circulaires distants de 300 µm (Échantillon N-10). On constate que la courbe I-V est très linéaire, et ce, à des intensités de courant assez élevées (100 mA).

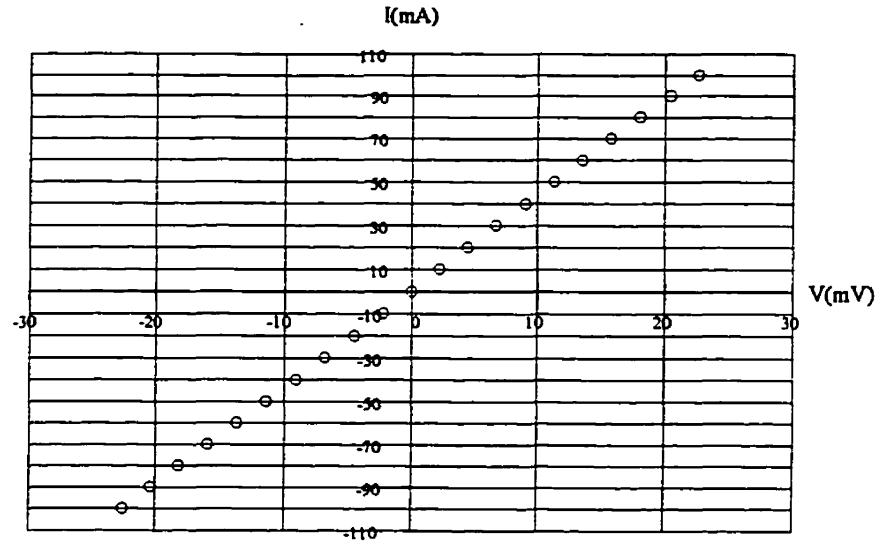


Figure 4.3 Courbe I-V relative au contact Au/AuGe/n-InP recuit à 370 °C durant deux minutes.

Les contacts Au/AuGe/n-InP recuits à une température de 350 °C montrent une très bonne uniformité de surface qui est indépendante de la durée de recuit. En fait, la texture et la couleur de la surface sont les mêmes que celles de la surface avant recuit. En ce qui concerne les contacts recuits à 370 °C, la couleur des contacts recuits est ausi dorée mais on observe la présence d'un certain nombre de pavés qui dépend cette fois-ci de la durée du recuit. Plus la durée du recuit est longue (2 min), plus les pavés sont nombreux. On montre à la figure 4.4, les surfaces de certains contacts Au/AuGe/n-InP recuits à 370 °C (Échantillons N-4/N-5).

(a) Contact Au/AuGe/n-InP recuit à 370 °C durant 15 secondes.

(b) Contact Au/AuGe/n-InP recuit à 370 °C durant deux minutes.

Figure 4.4 Photographies des contacts Au/AuGe/n-InP.

4.6 Résultats expérimentaux sur p-InP

4.6.1 Structures Au/Zn/p-InP et Au/Zn/Au/p-InP

A partir des expériences effectuées, il ressort clairement que la déposition d'une couche d'or sur le substrat d'InP est nécessaire si l'on veut obtenir une bonne adhésion des contacts à base de zinc. En effet, toutes les structures Au/Zn/p-InP que nous avons fabriquées sont caractérisées par une adhérence médiocre du zinc sur l'InP. Il suffisait de gratter quelque peu la couche métallique pour que le métal puisse s'enlever. Il nous a donc été impossible de caractériser électriquement ces contacts. Les contacts Au/Zn/Au/p-InP ont montré, de leur côté, une très bonne adhésion. Toutefois, aucun de ces contacts ne s'est avéré ohmique. On illustre à la figure 4.5, les courbes I-V des cinq

Groupe A - Attaque chimique au HF durant une minute

Échantillon	Structure et traitement thermique	Remarque
P-1	Au(123)/Zn(12)/Au(15)/p-InP; 400 °C - 2 min	Non-linéaire
P-2	Au(173)/Zn(12)/Au(15)/p-InP; 400 °C - 2 min	Non-linéaire
P-3	Au(173)/Zn(12)/Au(15)/p-InP; 425 °C - 2 min	Non-linéaire

Groupe B - Attaque chimique avec la solution $3H_2SO_4$:$1H_2O_2$:$1H_2O$ durant une minute

Échantillon	Structure et traitement thermique	Remarque
P-4	Au(120)/Zn(30)/p-InP; 420 °C - 2 min	Mauvaise adhésion
P-5	Au(120)/Zn(30)/p-InP; 420 °C - 7 min	Mauvaise adhésion
P-6	Au(120)/Zn(30)/p-InP; 450 °C - 45 sec	Mauvaise adhésion
P-7	Au(97)/Zn(70)/p-InP; 400 °C - 2 min	Mauvaise adhésion
P-8	Au(97)/Zn(70)/p-InP; 400 °C - 5 min	Mauvaise adhésion
P-9	Au(97)/Zn(70)/p-InP; 430 °C - 2 min	Mauvaise adhésion
P-10	Au(97)/Zn(70)/p-InP; 430 °C - 5 min	Mauvaise adhésion
P-11	Au(150)/Zn(20)/Au(10)/p-InP; 425 °C - 2 min	Non-linéaire
P-12	Au(150)/Zn(20)/Au(10)/p-InP; 450 °C - 2 min	Non-linéaire

Tableau 4.2 Résultats expérimentaux obtenus avec les structures Au/Zn/p-InP et Au/Zn/Au/p-InP.

échantillons Au/Zn/Au/p-InP. On observe, pour chacunes des expériences réalisées, que les contacts les moins résistifs sont ceux qui ont été recuits aux températures les plus élevées. On a noté, d'autre part, que l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'or extérieure entraîne une augmentation de la résistance de contact. Nous avons, dans la seconde expérience, réduit l'épaisseur de la couche d'or déposée sur le substrat à 10 nm. Cela avait pour but d'augmenter la diffusion du zinc à l'intérieur du substrat d'InP. Cela s'est traduit par une augmentation de la résistance du contact.

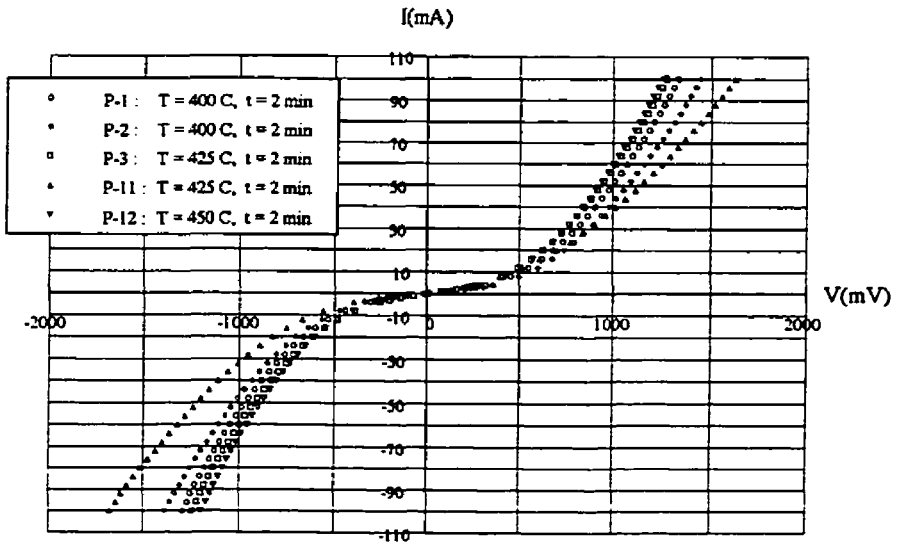
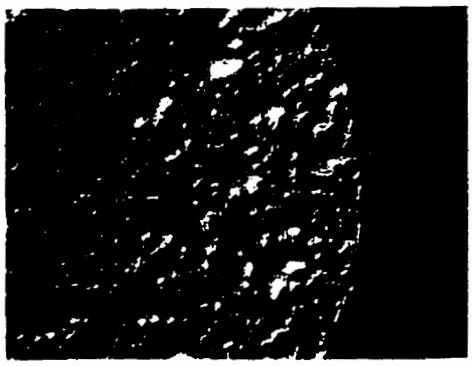


Figure 4.5 Courbes I-V relatives aux contacts Au/Zn/Au/p-InP.

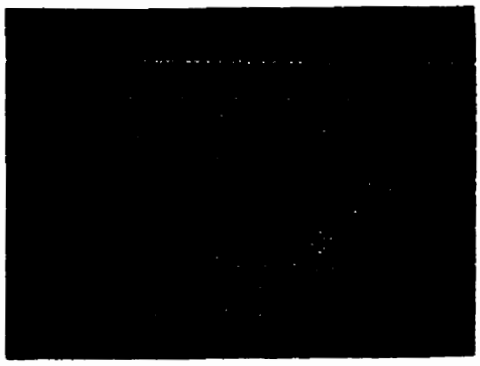
Les surfaces des contacts Au/Zn/Au/p-InP diffèrent de façon marquée selon le recuit effectué. Les photographies montrées à la figure 4.6 illustrent bien cela. Dans le cas de l' échantillon P-1 recuit à 400 °C durant deux minutes, on note une très forte inhomogénéité de la surface qui est caractérisée par des zones fondues irrégulières. Cela n'est pas le cas de l'échantillon P-11, recuit à 425 °C durant deux minutes, qui montre une surface beaucoup plus uniforme. Finalement, l'échantillon P-12 montre, près des

une surface quelque peu grisâtre qui dénote la présence d'une plus grande concentration de zinc.



a) Contact Au(123)/Zn(12)/Au(15)/p-InP recuit à 400 °C durant 2 minutes.

b) Contact Au(150)/Zn(20)/Au(10)/p-InP recuit à 425 °C durant 2 minutes.



c) Contact Au(150)/Zn(20)/Au(10)/p-InP recuit à 450 °C durant 2 minutes.

Figure 4.6 Photographies des contacts Au/Zn/Au/p-InP.

4.6.2 Structures AuZn/p-InP et AuZn/Au/p-InP

Nos expériences ont montré que la réalisation de la structure AuZn/p-InP n'était pas reproductible. En effet, à l'exception de deux expériences, tous les contacts AuZn n'ont pas adhéré au substrat d'InP. Nous avions réussi, lors de la première expérience, à réaliser des contacts qui ont très bien adhéré au substrat. C'est d'ailleurs, lors de cette expérience, que nous avons réussi à fabriquer le seul contact ohmique sur p-InP. Le tableau 4.3 donne les résultats obtenus avec la structure AuZn/p-InP. Le contact AuZn(130)/p-InP recuit à 400 °C durant deux minutes a résulté en une résistance spécifique de contact de $2{,}3 \cdot 10^{-4}\ \Omega\text{-cm}^2$. La même structure recuite à 420 °C durant la même période de temps a résulté en un contact moins linéaire. Toutefois, le contact recuit à 380 °C s'est avéré fortement non-linéaire. Ces résultats sont donc compatibles avec ceux de Kuphal (1981). Il a obtenu une température de recuit optimale de 400 °C pour une durée de recuit de deux minutes. Nous avons tenté de reproduire cette expérience à deux reprises, mais à chaque occasion, les contacts n'ont pas adhéré à la surface.

Dans le but de démontrer que l'évaporation préférentielle du zinc était la cause de la mauvaise adhérence de la couche métallique sur le substrat d'InP, nous avons réalisé une expérience qui consistait à exposer des échantillons (4) à des conditions d'évaporation

Groupe A - Attaque chimique au HF durant une minute

Échantillon	Structure et traitement thermique	Remarque
P-13	AuZn(130)/p-InP; 380 °C - 2 min	Non-linéaire
P-14	AuZn(130)/p-InP; 400 °C - 2 min	$r_c = 2{,}3 \cdot 10^{-4}\ \Omega\text{-cm}^2$
P-15	AuZn(130)/p-InP; 420 °C - 2 min	Non-linéaire

Groupe B - Attaque chimique avec la solution $3H_2SO_4{:}1H_2O_2{:}1H_2O$ durant une minute

Échantillon	Structure et traitement thermique	Remarque
P-16	AuZn(125)/p-InP; 400 °C - 2 min	Non-linéaire
P-17	AuZn(125)/p-InP; 400 °C - 5 min	Non-linéaire
P-18	AuZn(125)/p-InP; 420 °C - 2 min	Non-linéaire

Tableau 4.3 Résultats expérimentaux obtenus avec la structure AuZn/p-InP.

différentes. Deux échantillons ont été exposés à l'évaporation entière de l'alliage AuZn alors que nous avons mis la cache devant les deux autres échantillons durant les premiers instants de l'évaporation (≈ 3 sec). Le résultat a été concluant. Les échantillons qui ont été soumis aux jets des atomes évaporés durant toute la durée de l'opération ont vu leur couche métallique se détacher complètement de la surface du substrat alors que les contacts des deux autres échantillons ont tous, bien adhéré au substrat.

Le dépôt initial d'une couche d'or a un effet très bénéfique puisque tous les contacts AuZn/Au/p-InP sont caractérisés par une très bonne adhérence sur le substrat. Toutefois, aucun de ces contacts n'a montré de comportement électrique linéaire. Tel que l'illustrent les courbes I-V à la figure 4.7, les contacts AuZn/Au/p-InP sont plus résistifs que les contacts AuZn/p-InP. Il est difficile d'expliquer, cependant, le fait que le contact AuZn/p-InP recuit à 380 °C est plus résistif que le contact AuZn/Au/p-InP recuit, également, à 380 °C.

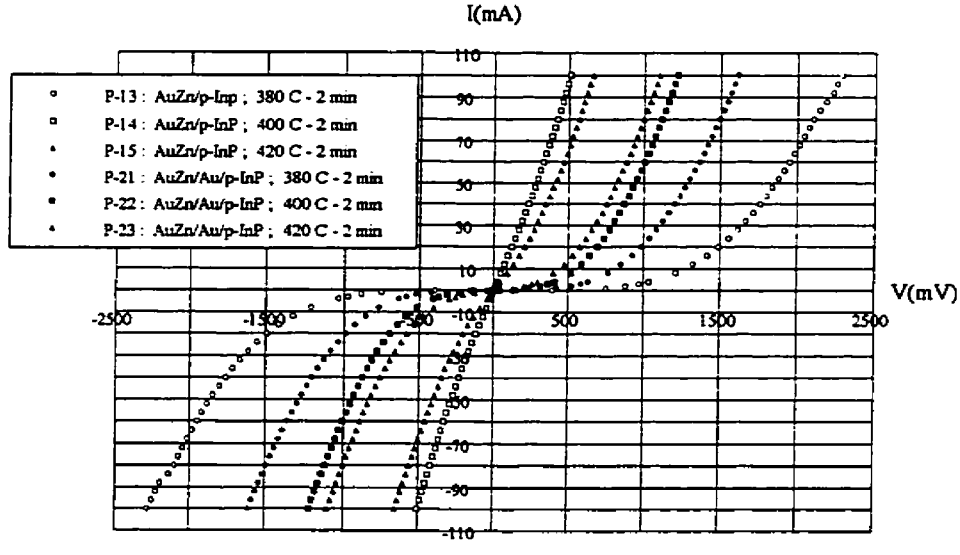


Figure 4.7 Courbes I-V relatives aux contacts AuZn/p-InP et AuZn/Au/p-InP.

Groupe A - Attaque chimique au HF : $10H_2O$ durant une minute

Échantillon	Structure et traitement thermique	Remarque
P-19	AuZn(145)/Au(4)/p-InP; 400 °C - 2 min	Non-linéaire
P-20	AuZn(145)/Au(4)/p-InP; 420 °C - 2 min	Non-linéaire
P-21	AuZn(125)/Au(8)/p-InP; 380 °C - 2 min	Non-linéaire
P-22	AuZn(125)/Au(8)/p-InP; 400 °C - 2 min	Non-linéaire
P-23	AuZn(125)/Au(8)/p-InP; 420 °C - 2 min	Non-linéaire

Groupe B - Attaque chimique avec la solution $3H_2SO_4$:$1H_2O_2$:$1H_2O$ durant une minute

Échantillon	Structure et traitement thermique	Remarque
P-24	AuZn(145)/Au(4)/p-InP; 400 °C - 2 min	Non-linéaire
P-25	AuZn(145)/Au(4)/p-InP; 420 °C - 2 min	Non-linéaire

Tableau 4.4 Résultats expérimentaux obtenus avec la structure AuZn/Au/p-InP.

Les surfaces des échantillons AuZn/p-Inp et AuZn/Au/p-InP ressemblent beaucoup aux surfaces des contacts que l'on retrouve dans la littérature. On montre les différentes surfaces obtenues aux figures 4.9 et 4.10. Dans le cas des contacts AuZn/p-InP (Échantillons P-13/P-14), il ressort une différence marquée par rapport à la texture de la surface selon la température de recuit choisie. Dans le cas du contact recuit à 380 °C, la couleur de la surface du contact est la même que la couleur du contact avant recuit. Il y a, toutefois, la formation de pavés. On présume que ces îlots sont, en fait, des pavés d'Au_2P_3 (Auvray, 1985b). Dans le cas des contacts recuits à 400 et 420 °C, nous avons observé aucune différence entre les deux surfaces. La surface devient rosée et le nombre de pavés augmente considérablement bien que la dimension de ceux-ci ait diminuée.

Contrairement au contact AuZn/p-InP recuit à 380 °C, le contact AuZn/Au/p-InP présente une surface dorée très uniforme exempte de pavés. On présume ainsi que la couche d'adhésion d'or modifie donc l'interaction chimique. Les textures des surfaces des contacts AuZn/Au/p-InP recuits à 400 et 420 °C ne sont pas les mêmes. Le contact recuit à 420 °C se caractérise par une plus grande densité de pavés. De plus, la couleur de la surface est moins rosée que le contact recuit à 400 °C. Il faut souligner que la couleur des contacts AuZn/Au/p-InP est beaucoup moins rosée que les contacts AuZn/p-InP.

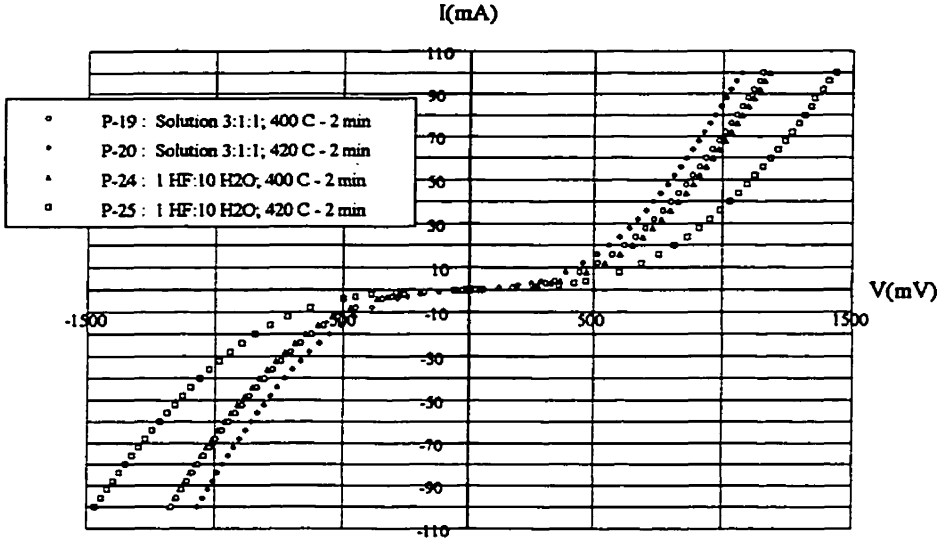


Figure 4.8 Comparaison des courbes I-V relatives aux contacts AuZn/Au/p-InP en fonction de la solution d'attaque employée.

Les courbes illustrées à la figure 4.8 montrent que les contacts AuZn/Au/p-InP les moins résistifs sont ceux qui on été réalisés sur une surface attaquée avec la solution $3H_2SO_4$:$1H_2O_2$:$1H_2O$.

(a) Contact AuZn(130)/p-InP recuit à 380 °C durant 2 minutes.

(b) Contact AuZn(130)/p-InP recuit à 400 °C durant 2 minutes.

Figure 4.9 Photographies des contacts AuZn/p-InP.

(a) Contact AuZn(125)/Au(8)/p-InP recuit à 400 °C durant 2 minutes.

(b) Contact AuZn(125)/Au(8)/p-InP recuit à 420 °C durant 2 minutes.

Figure 4.10 Photographies des contacts AuZn/Au/p-InP.

4.6.3 Structure Au/Pt/Ti/p-InP

Les contacts Au/Pt/Ti/p-InP se sont avérés non-linéaires. La résistance des contacts est fortement dépendante de la température de recuit. La résistance diminue avec l'augmentation de la température de recuit. Toutefois, un recuit à 450 °C durant deux minutes n'est pas suffisant pour que cela puisse permettre l'obtention d'un contact ohmique. La surface des contacts est très uniforme. Les courbes I-V sont données à la

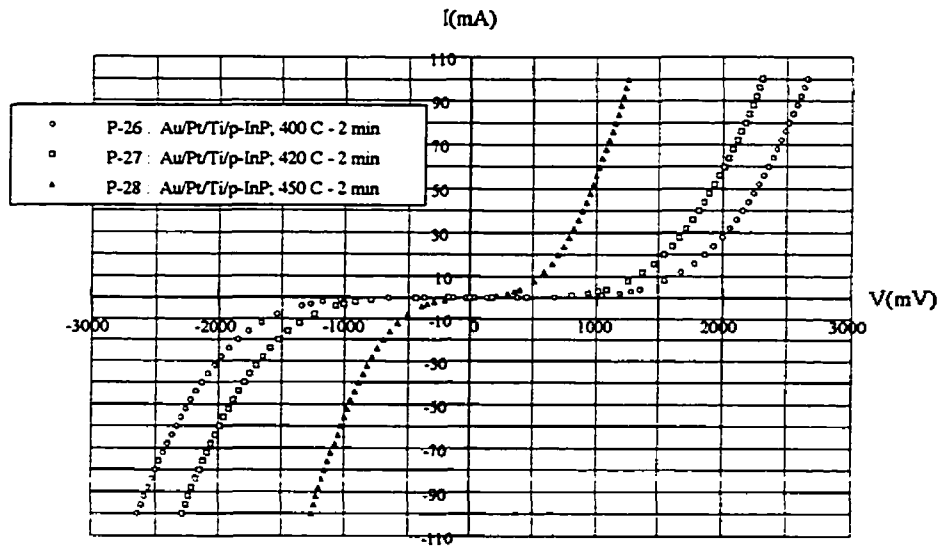


Figure 4.11 Courbes I-V relatives aux contacts Au/Pt/Ti/p-InP.

figure 4.11 et les résultats au tableau 4.5. Il faut souligner que la surface d'InP a été attaquée avec la solution $3H_2SO_4$:$1H_2O_2$:$1H_2O$ durant une minute.

Échantillon	Structure et traitement thermique	Remarque
P-26	Au(125)/Pt(25)/Ti(25)/p-InP; 400 °C - 2 min	Non-linéaire
P-27	Au(125)/Pt(25)/Ti(25)/p-InP; 420 °C - 2 min	Non-linéaire
P-28	Au(125)/Pt(25)/Ti(25)/p-InP; 450 °C - 2 min	Non-linéaire

Tableau 4.5 Résultats expérimentaux obtenus avec la structure Au/Pt/Ti/p-InP.

4.7 Discussion

La fabrication des contacts sur n-InP n'a posé aucune difficulté. L'obtention de contacts ohmiques à partir d'échantillons n'ayant subit aucun recuit illustre bien la grande facilité de réaliser un contact ohmique sur ce substrat. La formation du contact Au(100)/AuGe(100)/n-InP recuit à 370 °C durant deux minutes a résulté en la plus faible résistance spécifique de contact, soit $1{,}0 \cdot 10^{-6}$ Ω-cm^2. Toutefois, on privilégie la formation de la même structure mais recuite à 350 °C durant quinze secondes, principalement, parce que la différence (2 fois) entre les résistances de contact n'est pas assez appréciable. On sait que, dans le cas de notre diode laser, c'est le contact p-InP qui constitue l'élément le plus résistif. Il y a également deux autres avantages à choisir ce contact. Le premier est que la durée de recuit est beaucoup plus faible. Le second avantage est le fait qu'il s'agit d'un contact de type fritté, ce qui laisse suggérer que l'interface est moins tourmentée. On pourrait, à la limite, fabriquer un contact sans qu'il subisse un traitement thermique. La résistance de contact est, en effet, encore très faible devant la résistance du contact de type p. Toutefois, un contact non-recuit n'a pas atteint un stade métallurgique aussi stable qu'un contact recuit. De plus, un contact métal/semiconducteur qui est chauffé fait preuve d'une meilleure adhérence.

Dans le cas du substrat de type p, il nous a pas été possible de trouver une procédure simple pouvant nous permettre de réaliser des contacts ohmiques de façon reproductible. De l'ensemble des expériences réalisées avec les deux différentes sources de zinc, il ressort clairement que la réalisation des contacts à base de zinc nécessite la déposition initiale d'une couche d'or sur le substrat d'InP. Aucun des contacts Au/Zn/p-InP n'a été réussi en raison de la mauvaise adhérence du zinc sur l'InP. Dans le cas des contacts AuZn, l'adhérence de la couche métallique variait d'une expérience à l'autre. Toutefois, la

déposition initiale d'une couche d'or sur les substrats a toujours résulté en des contacts non-ohmiques.

Ce sont les contacts fabriqués avec l'alliage AuZn qui ont donné dans l'ensemble les meilleurs résultats. Le meilleur résultat que nous avons eu a été obtenu avec la structure AuZn(130)/p-InP recuite à 400 °C durant deux minutes. Toutefois, il n'a pas été possible, par la suite, de reproduire des résultats similaires. On croit que la raison pour laquelle il nous a pas été possible de reproduire les résultats de la première expérience est que la composition de l'alliage déposé variait d'une expérience à l'autre.

La composition de l'alliage variait parce que le taux de déposition en fonction du temps n'était pas le même lors de chaque expérience. En raison de l'évaporation préférentielle du zinc, il devient difficile de bien contrôler le taux d'évaporation. Or, on sait que la composition de l'alliage est fortement dépendante du taux de déposition. Plus le taux est élevé, plus la composition du dépôt est similaire à celui de l'alliage. De plus, il n'a pas été possible de garder un taux élevé et constant durant toute la durée de l'évaporation. Nous avons, en effet, toujours observé deux phases d'évaporation lorsque nous avons utilisé cet alliage, le taux étant très élevé et instable au début, pour ensuite diminuer et devenir plus contrôlable. On associe cette dernière phase à la disparition du zinc de l'alliage. Le taux de déposition (≈ 10 nm/s) que nous avons obtenu était moins élevé que celui rapporté par Malina et al. (1994) et qui était de 15-25 nm/s. Mais il se pose, ici, une autre difficulté liée au choix des paramètres de déposition. Il nous apparait extrêmement difficile d'attribuer, à des alliages constitués de métaux aussi différents, un choix correct de paramètres puisque la composition du mélange varie beaucoup et rapidement. Dans notre cas, nous avons choisi, pour l'alliage AuZn, les mêmes paramètres qui se rapportent à l'or.

Malina et al. (1994) ont proposé une solution technique pour rendre le comportement électrique des contacts indépendant du taux de déposition utilisé. Cette solution consiste à refroidir les échantillons durant la déposition métallique. Une température comprise dans l'étendue 30-50 °C permet une condensation rapide des atomes de zinc sur la surface du substrat. Toutefois, il faut s'interroger sur l'effet que crée le refroidissement sur l'adhésion des contacts sur l'InP. De plus, cela ne règle pas le problème de la déposition inhomogène aléatoire de l'alliage.

L'avantage que présente les contacts réalisés avec du zinc pur en comparaison avec les contacts fabriqués avec l'alliage AuZn est que l'on contrôle entièrement la composition de

la couche de zinc, ce qui n'est pas le cas avec la déposition de l'alliage AuZn pour lequel il existe un gradient de concentration qui varie d'une expérience à l'autre. Le comportement électrique des contacts Au/Zn/Au/p-InP serait amélioré si l'on ajoutait une couche de nickel pour contrer la diffusion externe du zinc. On pose l'hypothèse, pour expliquer le comportement non-linéaire de nos contacts, que le zinc diffuse vers l'extérieur plutôt que vers l'interface. La structure Au/Ni/Au/Zn/Au/p-InP aurait donc l'avantage de confiner le dopant près de l'interface. On croit aussi que la reproductibilité serait accrue. Il est à souligner qu'il nous a pas été possible de réaliser, par la suite, la structure Au/Ni/Au/Zn/Au/p-InP parce que l'évaporateur muni du dispositif d'évaporation par faisceau électronique ne fonctionnait pas.

Il a été étonnant de constater qu'aucun des contacts Au/Zn/Au/p-InP ne présentait une surface rosée que l'on obtient généralement avec cette structure. Tous les contacts réalisés avec l'alliage AuZn présentent tous une couleur rose. Il est important de souligner, à ce sujet, que ces derniers contacts ont été tous recuits dans le four que nous avons fabriqué, alors que les recuits des contacts Au/Zn/Au/p-InP ont été effectués avec le four AG Associates.

Bien que nous ayons réalisé un nombre d'expériences assez restreint, la fabrication des contacts ohmiques à base de zinc ne s'avère pas une tâche facile. Il faut rappeler que nous avons été contraint à choisir le zinc comme dopant, et ce, malgré tous les inconvénients que cela comporte, tant au point de vue technique que physico-chimique. Pour ce qui est des contacts Au/Pt/Ti/p-InP, ils se n'avèrent pas une alternative valable aux contacts à base de zinc en raison de la caractéristique I-V non-linéaire qu'ils génèrent.

La meilleure façon d'éviter les difficultés liées à la fabrication des contacts à base de zinc est d'adopter l'approche qui consiste à former le contact métallique sur l'hétérojonction p-$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/p-InP. Il est alors plus facile de réaliser une jonction ohmique en réalisant la structure Au/Pt/Ti/p-$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/p-InP. De plus, il a été montré, par Katz et al. (1992), que l'on pouvait obtenir un contact ohmique avec une faible résistance spécifique de contact de l'ordre de 10^{-5} Ω-cm^2 sans que l'on fasse subir un recuit au contact. C'est un avantage important dans la procédure de fabrication. Cette approche devient de plus en plus populaire.

Il serait souhaitable d'utiliser des techniques d'analyse appropriées dans le but d'étudier le comportement électrique des contacts en relation avec leur métallurgie. On pense notamment aux techniques de spectrométrie par rétrodiffusion Rutherford (RBS), de

spectrométrie de masse d'ions secondaires (SIMS) et de spectroscopie des électrons Auger (AES). Ces différentes techniques nous permettrait de trouver la concentration et le profil des divers éléments présents près de l'interface. Il est difficile, autrement, de faire une analyse rigoureuse du comportement électrique des contacts au seul moyen de la caractéristique r_c.

Conclusion

Il a été démontré, dans ce travail, que la réalisation de contacts ohmiques sur le substrat n-InP fortement dopés ($6 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}) ne posait aucun problème. Toutes les structures Au(100)/AuGe(100)/n-InP que nous avons réalisées ont toutes résulté en des contacts ohmiques avec des résistances spécifiques de contact inférieures à 10^{-5} Ω-cm^2. Même les structures qui n'ont pas subit de traitement thermique exhibent des caractéristiques électriques linéaires. La plus faible valeur de r_c ($1{,}0 \cdot 10^{-6}$ Ω-cm^2) a été obtenu pour un contact allié recuit à 370 °C durant deux minutes. On recommande la formation du contact fritté recuit à 350 °C durant quinze secondes. Ce contact est à peine deux fois plus résistif que le meilleur contact fabriqué. Cela est négligeable devant la valeur de la résistance du contact métallique sur p-InP. Ce qui importe surtout, c'est la faible durée du recuit et la plus faible température utilisée.

Dans le cas du substrat de type p, il nous a pas été possible d'établir une procédure simple et reproductible menant à la réalisation de contacts ohmiques utilisant le zinc sur p-InP. Bien que le nombre d'expériences réalisées sur le substrat d'InP ait été peu nombreux, les résultats obtenus sont une bonne indication de la difficulté à réaliser un contact ohmique sur ce substrat. Les expériences réalisées ont témoigné, en effet, de l'énorme difficulté que représente la réalisation des contacts ohmiques à base de zinc. En plus du comportement électrique non-linéaire, la mauvaise adhérence du zinc et de l'alliage AuZn sur le substrat d'InP représente l'autre difficulté majeure. Nous avons trouvé que la déposition d'une couche d'or sur le substrat d'InP est nécessaire pour obtenir une bonne adhésion des contacts.

Le seul contact ohmique que nous avons réussi à fabriquer a été réalisé avec le contact AuZn/p-InP recuit à 400°C durant deux minutes et a résulté en une résistance spécifique de contact de $2{,}3 \cdot 10^{-4}$ Ω-cm^2. Il n'a pas été possible de reproduire ce résultat en raison de la mauvaise adhérence de l'alliage. On attribue cela à l'impossibilité de contrôler la composition de l'alliage déposé. Pour cette raison qui s'ajoute, en plus, à d'autres difficultés techniques, on conclut que la réalisation des contacts de type p sur InP fabriqués avec l'alliage AuZn ne s'avère pas souhaitable si l'on veut obtenir une bonne reproductibilité.

En terme de reproductibilité, la réalisation de la structure Au/Ni/Au/Zn/Au/p-InP s'avère plus souhaitable. L'ajout de la couche de nickel joue alors le rôle d'une barrière contre la diffusion externe du zinc. On croit que la diffusion externe du zinc est la cause de la non-linéarité des contacts Au/Zn/Au/p-InP.

Selon nous, la formation des contacts à base de zinc nécessite l'emploi de techniques supplémentaires. On pense notamment à l'utilisation d'un porte-échantillon avec lequel on peut chauffer et refroidir le substrat, de même qu'à la technique de nettoyage par sputtering sous vide.

On croit toutefois que l'avenue la plus prometteuse pour réaliser des contacts ohmiques sur p-InP consiste à réaliser la structure Au/Pt/Ti/p-$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/p-InP. On recommande, finalement, l'emploi de techniques d'analyse qui sont communément employées lors des études sur les contacts ohmiques. Ces techniques pourraient nous permettre de faire la corrélation entre la nature métallurgique du contact et ses propriétés électriques, chose qui n'a pas été faite dans ce projet.

Références

AUVRAY, P., GUIVARC'H, A. et HENOC, P. (1985). Les contacts ohmiques à base d'or sur les semiconducteurs III-V. Le Vide - Les Couches Minces, 40, 226, 109-121

AUVRAY, P., GUIVARC'H, A., L'HARIDON, H. et MERCIER, J.P. (1985). Formation, microstructure et résistances des contacts AuGe/n-GaAs, AuGe/n-InP, AuZn/p-InP et AuBe/p-InP. Thin Solid Films, 127, 39-68

AVEN, M. et SWANK, R.K. (1969). Ohmic contacts to wide-band-gap semiconductors. Ohmic contacts to semiconductors, The Electrochemical Society Inc., 69-81

BAHIR, G., MERZ, J.L., ABELSON, J.R. et SIGMON, T.W. (1987). Rapid thermal alloyed ohmic contact on InP. J. Electron. Mat., 16, 4, 257-262

BARDEEN, J. (1947). Surface states and rectification at a metal-semiconductor contact. Phys. Review, 71, 717-725

BARNES, P.A. et PAOLI, T.L. (1976). Derivative measurements of the current-voltage characteristics of double-heterostructure injection lasers. IEEE J. Quantum Electron., QE-12, 10, 633-639

BARNES, P.A. et WILLIAMS, R.S. (1981). Alloyed tin-gold ohmic contacts to n-type indium phosphide. Solid-State Electron., 24, 10, 907-913

BERGER, H.H. (1969). Contact resistance on diffused resistors. ISSCC Digest of Tech. Papers, 160-161

BERGER, H.H. (1972). Models for contacts to planar devices. Solid-State Electron., 15, 145-158

BINARI, S.C. et BOOS, J.B. (1989). AuGe/Au ohmic contacts to n-type InP by hot plate alloying. Electron. Lett., 25, 18, 1207-1209

BRASLAU, N. (1981). Alloyed ohmic contacts to GaAs.
J. Vac. Sci. Tech., 19, 3, 803-807

BRILLSON, L.J. (1978). Transition in Schottky barrier formation with chemical reactivity. Phys. Rev. Lett., 40(4), 260-263

CHENG, C.L., COLDREN, L.A., MILLER, B.I. et RENTSCHLER, J.A. (1982). Low-resistance ohmic contacts to p-InP. Electron. Lett., 18, 17, 755-756

CHU, S.N.G., KATZ, A., BOONE, T., THOMAS, P.M., RIGGS, V.G., DAUTREMONT-SMITH, W.C. et JOHNSTON, W.D. Jr. (1990). Interfacial microstructure and electrical properties of the Pt/Ti ohmic contact in p-$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ formed by rapid thermal processing. J. Appl. Phys., 67, 8, 3754-3760

CLAUSEN, T. et LEISTIKO, O. (1993). Transport mechanisms in low-resistance ohmic contacts to p-InP formed by rapid thermal annealing. Appl. Phys. Lett., 62, 10, 1108-1109

COWLEY, A.M. et SZE, S.M. (1965). Surfaces states and barrier height of metal-semiconductor systems. J. Appl. Phys., 36, 10, 3212-3220

COX, R.H. et STRACK, H. (1967). Ohmic contacts for GaAs devices. Solid-State Electron., 10, 1213-1218

DAUTREMONT-SMITH, W.C., BARNES, P.A. et STAYT, J.W. Jr (1984). A non-alloyed, low specific resistance ohmic contact to n-InP. J. Vac. Sci. Tech. B, 2, 4, 620-625

DAW, M.S. et SMITH, D.L. (1980). Energy levels of semiconductor surface vacancies.
J. Vac. Sci. Tech., 17, 5, 1028-1031

DEL ALAMO, J.A. et MIZUTANI, T. (1988). AuGeNi ohmic contacts to n-InP for FET applications. Solid-State Electron., 31, 11, 1635-1639

DUNN, J. et STRINGFELLOW, G.B. (1990). Annealed AuGe based ohmic contacts on InP with ion milling prior to metallization. J. Electron. Mat., 19, 2, L1-3

ERICKSON, L.P., WASEEM, A. et ROBINSON, G.Y. (1979). Characterization of ohmic contacts to InP. Thin Solid Films, 64, 421-426

FANG, Y.K., CHANG, C.Y. et SU, Y.K. (1979). Contact resistance in metal-semiconductor systems. Solid-State Electron., 22, 933-938

FREEOUF, J.L. et WOODALL, J.M. (1981). Schottky barriers : An effective work function model. Appl. Phys. Lett., 39(9), 727-729

GUIVARC'H, A., L'HARIDON, H. et PELOUS, G. (1984). Chemical cleaning of InP surfaces : oxide composition and electrical properties. J. Appl. Phys., 55, 4, 1139-1148

HARRISON, H.B. et REEVES, G.K. (1992). Assessing ohmic contacts. Advanced metallization and processing for semiconductor devices and circuits - II. Materials Research Society, 260, 31-42

HASENBERG, T.C. et GARMIRE, E. (1986). An improved Au/Be contact to p-type InP. J. Appl. Phys., 61, 2, 808-809

HEINE, V. (1965). Theory of surface states. Phys. Rev., 138, 6A, A1689-1696

HENISCH, H.K. (1957). Rectifying semi-conductor contacts. Clarendon Press, 218-220

ISMAIL, A., PALAU, J.M. et LASSABATÈRE, L. (1984). Formation de l'interface métal/InP et de diodes Schottky sur InP. Revue Phys. Appl., 19, 205-214

KAMINSKA, E., PIOTROWSKA, A., BARCZ, A., ADAMCZEWSKA, J. et TUROS, A. (1986). Interaction of Au/Zn/Au sandwich contact layers with $A^{III}B^{V}$ compound semiconductors. Solid-State Electron., 29, 3, 279-286

KATZ, A., WEIR, B.E. et DAUTREMONT-SMITH, W.C. (1990). Au/Pt/Ti contacts to p-$In_{0.53}Ga_{0.57}As$ and n-InP layers formed by a single metallization common step and rapid thermal processing. J. Appl. Phys., 68, 3, 1123-1128

KATZ, A. et PEARTON, S.J. (1991). Alloyed contacts to susceptor rapid thermal annealed Si-implanted InP. J. Vac. Sci. Tech. B, 9, 1, 178-180

KATZ, A., CHU, S.N.G., WEIR, B.E., ABERNATHY, C.R., HOBSON, W.S., PEARTON, S.J. et SAVIN, W. (1992). Rapid isothermal processing of Pt/Ti contacts to p-type III-V binary and related ternary materials. IEEE Trans. Electron. Dev., ED-39, 1, 184-192

KUPHAL, E. (1981). Low resistance ohmic contacts to n- and p-InP. Solid-State Electron., 24, 1, 69-78

MALINA, V., VOGEL, K. et ZELINKA, J. (1988). Au-Be/Au and Au-Be/Cr/Au ohmic contacts to p-type InP and InGaAsP. Semic. Sci. Tech., 3, 10, 1015-1021

MALINA, V., SCHADE, U. et VOGEL, K. (1994). Technological aspects of the preparation of Au-Zn ohmic contacts to p-type InP. Semic. Sci. Tech., 9, 49-53

MALINA, V., MICHELI, V., KOHOUT, J. et BERKOVA, D. (1994). Effect of deposition parameters on the electrical and metallurgical properties of Au-Zn contacts to p-type InP. Semic. Sci. Tech., 9, 1523-1528

MARLOW, G.S. et DAS, M.B. (1982). The effects of contact size and non-zero metal resistance on the determination of specific contact resistance. Solid-State Electron., 25, 2, 91-94

McCALDIN, J.O., McGILL, T.C. et MEAD, C.A. (1976). Correlation for III-V and II-VI semiconductors of the Au Schottky barrier energy with anion electronegativity. Phys. Rev. Lett., 36 , 1, 56-58

McCALDIN, J.O., McGILL, T.C. et MEAD, C.A. (1976). Schottky barriers on compound semiconductors : The role of the anion. J. Vac. Sci. Tech., 13, 4, 802-806

MILLS, H.T. et HARTNAGEL, H.L. (1975). Ideal ohmic contacts to InP. Electron. Lett., 11, 25, 621-622

MILNES, A.G. et FEUCHT, D.L. (1972). Metal-semiconductor barriers. Heterojunctions and metal-semiconductor junctions. Academic Press, 156-176.

MURRMANN, H. et WIDMANN, D. (1969). Current crowding on contacts to planar devices. ISSCC Digest Tech. Papers, 162-163

NAKAHARA, S., GALLAGHER, P.K., FELDER, E.C et LAWRY, R.B. (1984). Interaction between zinc metallization and indium phosphide. Solid-State Electron., 27, 6, 557-564

OPARAKU, O., DARGAN, C.L., PEARSALL, N.M. et HILL, R. (1990). Characterisation of Zn/Au back contact to low-doped p-InP. Semic. Sci. Tech., 5, 65-68

PADOVANI, F.A. et STRATTON, R. (1966). Field and thermionic-field emission in Schottky barriers. Solid-State Electron., 9, 695-707

PALAU, J.M., ISMAIL, A. et LASSABATERE, L. (1985). Barrière de surface et de Schottky dans GaAs et InP. Le Vide - Les Couches Minces, 40, 226, 137-143

PIOTROWSKA, A., AUVRAY, P., GUIVARC'H, A., PELOUS, A. et HENOC, P. (1981). On the formation of binary compounds in Au/InP system. J. Appl. Phys., 52, 8, 5112-5117

PIOTROWSKA, A., KAMINSKA, E., BARCZ, A., ADAMCZEWSKA, J. et TUROS, A. (1985). Gold-based ohmic contacts on III-V compounds : Thermally induced reactions between metallization and the semiconductor compound. Thin Solid Films, 130, 231-236

PROCTOR, S.J. et LINHOLM, L.W. (1982). A direct measurement of interfacial contact resistance. IEEE Electron. Dev. Lett., EDL-3, 10, 294-296

REEVES, G.K. (1980). Specific contact resistance using a circular transmission line model. Solid-State Electron., 23, 487-490

REEVES, G.K. et HARRISON, H.B. (1982). Obtaining the specific contact resistance from transmission line model measurements. IEEE Electron. Dev. Lett., EDL-3, 5, 111-113

RHODERICK, E.H. et WILLIAMS, R.H. (1988). Metal-semiconductor contacts, 2ième édition, Clarendon Press, 17-20

SEBESTYEN, T. (1982). Models for ohmic contacts on graded crystalline or amorphous heterojunctions. Solid-State Electron., 25, 7, 543-550

SPICER, W.E., CHYE, P.W., SKEATH, P.R., SU, C.Y. et LINDAU. I. (1979). New and unified model for Schottky barrier and III-V insulator interface states formation. J. Vac. Sci. Tech., 16, 5, 1422-1433

TEMKIN, H., McCOY, R.J., KERAMIDAS, V.G. et BONNER, W.A. (1980). Ohmic contacts to p-type InP using Be-Au metallization. Appl. Phys. Lett., 36, 6, 444-446

TERRY, L.E. et WILSON, R.W. (1969). Metallization systems for silicon integrated circuits. Proc. IEEE, 57, 9, 1580-1586

THOMPSON, A.G. et ROSS, B. (1970). Final technical report, no. TR-6, Bell and Howell

TSENG, W., CHRISTOU, A., DAY, H., DAVEY, J. et WILKINS, B. (1981). Ohmic contacts to lightly doped n and p indium phosphide surfaces. J. Vac. Sci. Tech., 19, 3, 623-625

TUCK, B. et ZAHARI, M.D. (1977). Electrical measurements on homogeneous diffused p-type InP. J.Phys.D, 10, 18, 2473-2479

VALOIS, A.J. et ROBINSON, G.Y. (1982). Au/Be ohmic contacts to p-type indium phosphide. Solid-State Electron., 25, 10, 973-977

VERLANGIERI, P.A., KUZNETSOV, M. et SCHNEIDER, M.V. (1991). Low resistance ohmic contacts for microwave and lightwave devices. IEEE Micro. Guid. Wave Lett., 1, 3, 51-53

WAGER, J.F., ELLSWORTH, D.L., GOODNICK, S.M. et WILMSEN, C.W. (1981). Composition and thermal stability of thin native oxides on InP. J. Vac. Sci. Tech., 19, 3, 513-518

WOODALL, J.M. et FREEOUF, J.L. (1981). GaAs metallization : Some problems and trends. J. Vac. Sci. Tech., 19(3), 794-798

WOODALL, J.M., FREEOUF, J.L., PETTIT, G.D., JACKSON, T. et KIRCHNER, P. (1981). Ohmic contacts to n-GaAs using graded band gap layers of $Ga_{1-x}In_xAs$ grown by molecular beam epitaxy. J. Vac. Sci. Tech., 19(3), 626-627

WOODALL, J.M. et FREEOUF, J.L. (1982). Summary abstract : Are they really Schottky barriers after all? J. Vac. Sci. Tech., 21(2), 574-576

Annexe A - Modèle de la ligne de transmission (TLM)

A.1 Théorie de la ligne de transmission et modélisation du contact ohmique

La modélisation électrique du contact de type planaire par le biais du modèle de la ligne de transmission (TLM) a été développé indépendamment par Berger (1969) et Murrmann et Widmann (1969). On considère dans le développement qui suit que l'épaisseur de la couche semiconductrice est négligeable malgré le fait que l'on attribue une résistance carrée R_{sk} de valeur finie. On ne tient donc pas compte de la structure verticale de la couche semiconductrice. Dans le cas contraire, une analyse en deux dimensions s'avérerait alors nécessaire. Berger (1972) a introduit un terme correcteur qui tient compte, dans certaines conditions, de la structure verticale. On négligera également la résistivité de la couche métallique.

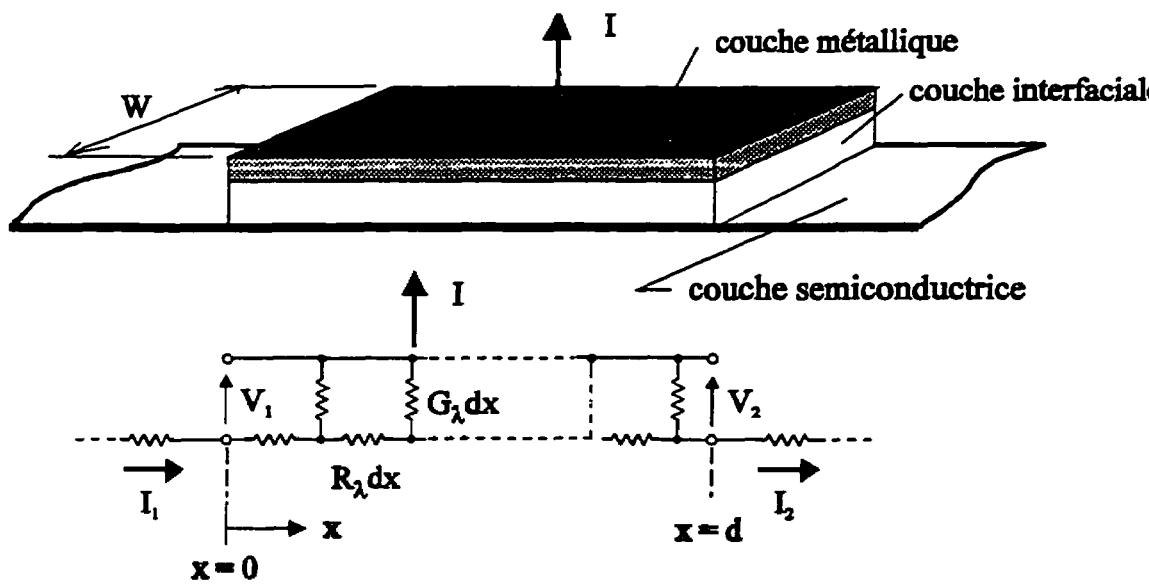


Figure A.1 Circuit équivalent du contact de type horizontal selon le modèle de la ligne de transmission.

On représente le contact ohmique par la ligne de transmission illustrée à la figure A.1. Chaque élément différentiel dx représente un quadripôle purement résistif. L'élément G_λ dx représente la conductance verticale de l'élément de surface Wdx alors que $R_\lambda dx$ représente la résistance de la couche semiconductrice due à l'élément de longueur dx.

L'analyse intégrale de la théorie de la ligne de transmission implique l'existence d'éléments réactifs. On négligera dans le cas présent les effets réactifs puisque la caractérisation électrique est effectuée en courant continu.

L'analyse de cette ligne de transmission purement résistive se ramène donc au cas du modèle différentiel ordinaire. A partir de la figure A.1, on peut déduire les relations différentielles suivantes;

$$dV = I(x)\, R_\lambda\, dx \qquad (A.1)$$

$$dI = V(x + dx)\, G_\lambda\, dx$$

$$\approx V(x)\, G_\lambda\, dx \qquad (A.2)$$

car au premier ordre $V(x + dx) \approx V(x)$. En différenciant l'expression A.1 et en la combinant avec l'expression A.2, on est en mesure de déduire les solutions générales de l'équation différentielle du deuxième ordre;

$$V(x) = V_1 \cosh(\alpha x) - V_2 \sinh(\alpha x) \qquad (A.3)$$

$$I(x) = I_1 \cosh(\alpha x) - I_2 \sinh(\alpha x) \qquad (A.4)$$

$$\text{avec} \quad \alpha = (R_\lambda G_\lambda)^{1/2} \qquad (A.5).$$

A.2 Définition géométrique du contact ohmique de type horizontal

Définissons maintenant la résistance de contact R_c et la résistance de transfert R_e à l'aide de la figure A.2. Les surfaces ombrées représentent les contacts métalliques. On définit ces résistances au moyen des plans imaginaires X, Y et Z. Chacun des plans est posé comme étant équipotentiel. La résistance de contact R_c est le rapport de la tension V_{XY} entre les plans X et Y, et le courant I qui traverse ces plans. R_c représente ainsi la résistance due à la traversée des porteurs à travers la couche interfaciale de même que la résistance due au resserrement des lignes de courant. On définit la résistance de transfert R_e comme étant le rapport entre la tension V_{YZ} entre les plans Y et Z, et le courant I qui

traverse le plan Y. Les expressions de R_c et R_e sont alors données par;

$$R_c = V_{XY}/I \qquad (A.6) \qquad\qquad R_e = V_{YZ}/I \qquad (A.7)$$

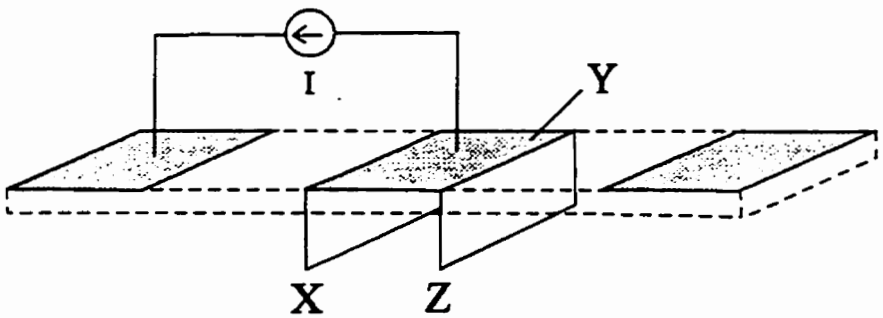


Figure A.2 Schéma des plans principaux.

A.3 Expressions de $R_c(Z_o,L_t)$ et $R_e(Z_o,L_t)$

En se rapportant à la figure A.1, associons respectivement les tensions V_{XY} et V_{YZ} aux tensions V(0) et V(d) en faisant correspondre le plan X à x = 0. En posant les conditions frontières $V(0) = V_o$ et $I(0) = I_o$, on trouve;

$$V(x) = V_o \cosh(x/L_t) - Z_o I_o \sinh(x/L_t) \qquad (A.8)$$
$$I(x) = I_o \cosh(x/L_t) - (V_o/Z_o) \sinh(x/L_t) \qquad (A.9)$$

avec $Z_o = (R_\lambda/G_\lambda)^{1/2}$ (A.10) et $L_t = \alpha^{-1}$ (A.11).

L_t représente la longueur de transfert. Il faut poser une autre condition physique pour être en mesure d'exprimer R_c et R_e en fonction des paramètres d, Z_o et L_t. Cette condition est I(d) = 0. En se reportant aux expressions A.6 et A.7, on trouve;

$$R_c = V_o/I_o = Z_o \coth(d/L_t) \qquad (A.12)$$
$$R_e = V(d)/I_o = Z_o/\sinh(d/L_t) \qquad (A.13)$$

A.4 Expressions de $Z_0(R_c,R_e)$ et $L_t(R_c,R_e)$

En combinant les expressions A.12 et A.13, on obtient les expressions;

$$Z_o = (R_c^2 - R_e^2)^{1/2} \qquad (A.14)$$

$$L_t = d/\cosh^{-1}(R_c/R_e) \qquad (A.15)$$

A.5 Expression de $R_c(R_{sk},L_t)$

Exprimons R_λ et G_λ en fonction de r_c, R_{sk} et W.

$$R_\lambda = R_{sk}/W \qquad (A.16) \qquad\qquad G_\lambda = W/r_c \qquad (A.17)$$

En combinant ces deux relations avec les expressions A.5, A.10 et A.11 on trouve premièrement;

$$Z_o = r_c R_{sk} / W^2 \qquad (A.18) \qquad \text{et} \qquad L_t = (r_c/R_{sk})^{1/2} \qquad (A.19)$$

Puis à l'aide de A.12 on obtient; $\qquad R_c = (R_{sk}L_t/W)\coth(d/L_t) \qquad (A.20)$

A.6 Expressions de $r_c(R_c,R_e)$ et $R_{sk}(R_c,R_e)$

En utilisant les expressions A.14, A.15, A.18 et A.19, on obtient finalement les expressions;

$$R_{sk} = \frac{WZ_o}{L_t} = (W/d)(R_c^2 - R_e^2)^{1/2} \cosh^{-1}(R_c/R_e) \qquad (A.21)$$

$$r_c = WZ_oL_t = \frac{Wd\left(R_c^2 - R_e^2\right)^{1/2}}{\cosh^{-1}(R_c/R_e)} \qquad (A.22)$$

On exprime généralement la résistance spécifique r_c par la simple relation;

$$r_c = R_{sk} L_t^2 \qquad (A.23)$$

Annexe B - Méthode de Barnes et Paoli

La méthode de Barnes et Paoli (1976) sert à déterminer directement les caractéristiques électriques d'une diode laser. Ces caractéristiques sont la résistance série R, le paramètre exponentiel de la jonction η, ainsi que le courant de seuil. Le principe de la méthode consiste à superposer une modulation de courant ac à un courant continu puis à mesurer la réponse sinusoidale de la tension au borne de la diode.

On représente la diode laser par le circuit équivalent illustré à la figure B.1.

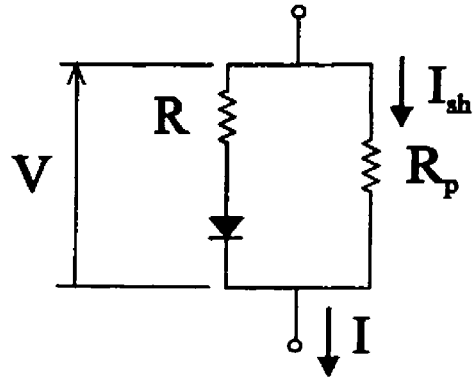


Figure B.1 Circuit électrique équivalent de la diode laser.

De ce schéma, on peut en tirer l'expression suivante;

$$I = \frac{V}{R_p} + I_s\left(\exp\left[\left[(1+\frac{R}{R_p})V - IR\right]\frac{\eta kT}{q}\right] - 1\right) \qquad (B.1)$$

où R_p représente la résistance shunt et I_s, le courant de saturation. En raison de sa valeur élevée, on peut négliger l'effet de R_p. On a donc;

$$I = I_s\left(\exp\left[\frac{(V - IR)}{\eta kT/q}\right] - 1\right) \qquad (B.2)$$

En reformulant l'expression ci-dessus sous la forme V(I), on trouve;

$$V = IR + \frac{\eta kT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_s} + 1\right) \qquad (B.3)$$

Du fait que $I_s << I$, V devient;

$$V = IR + \frac{\eta kT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_s}\right) \qquad (B.4)$$

En dérivant ensuite V par rapport à I, on obtient;

$$\frac{dV}{dI} = R + \frac{\eta kT}{qI} \qquad (B.5)$$

Si on développe maintenant V autour de I en série de Taylor on a;

$$V(I + \Delta I) = V(I) + \frac{dV(I)}{dI}\Delta I + \frac{d^2V(I)}{dI^2}(\Delta I)^2 + \ldots \qquad (B.6)$$

$$V(I + dI) = V(I + i\cos(\omega t)) \qquad (B.7)$$

$$V(I + \Delta I) = V_{dc}(I) + i\cos(\omega t)\frac{dV(I)}{dI} + i^2\cos^2(\omega t)\frac{d^2V(I)}{dI^2} + \ldots \qquad (B.8)$$

$$V(I + \Delta I) = \left[V_{dc}(I) + \frac{i^2}{4}\frac{d^2V(I)}{dI^2} + \ldots\right] + \left[i\frac{dV(I)}{dI} + \frac{i^3}{8}\frac{d^3V(I)}{dI^3} + \ldots\right]\cos(\omega t) + \ldots$$

$$\ldots + \left[\frac{i^2}{4}\frac{d^2V(I)}{dI^2} + \frac{i^4}{48}\frac{d^4V(I)}{dI^4} + \ldots\right]\cos(2\omega t) + \ldots \qquad (B.9)$$

On peut approximer, dans le cas où l'indice de modulation i/I est beaucoup plus petit que l'unité, l'expression B.9 par l'expression B.10 où l'on garde uniquement le premier terme de chaque composante fréquentielle.

$$V(I+\Delta I) = V_{dc}(I) + i\frac{dV(I)}{dI}\cos(\omega t) + \frac{i^2}{4}\frac{d^2V(I)}{dI^2}\cos(2\omega t) + \ldots \quad (B.10)$$

En remplaçant dV/dI et d^2V/dI^2 par l'expression B.5 et sa dérivée on obtient finalement l'expression voulue;

$$V(I+\Delta I) = V_{dc}(I) + \left(R+\frac{\eta kT}{qI}\right) i\cos(\omega t) + \frac{\eta kTi^2}{4qI^2}\cos(2\omega t) + \ldots \quad (B.11)$$

Pour des indices de modulation plus petits que 0.1, les erreurs d'approximations sont respectivement de 0.25% pour le terme devant cos(wt) et de 0.50% pour le terme devant cos(2wt).

La mesure de la tension correspondant à la première harmonique nous donne donc une valeur proportionnelle à dV/dI. Il est plus facile de calculer R en traçant le graphique de IdV/dI en fonction de I. La pente de la droite obtenue correspond alors directement à R, et l'ordonnée à l'origine, à μkT/q.

Annexe C - Résultats publiés dans la littérature

C.1 Résultats expérimentaux sur n-InP

Contacts à base de germanium (Ge)

Katz et Pearton, 1991
$n = 3 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}; implantation ionique de silicium (Si)
AuGe(300)/n-InP
T = 375 °C, t = 30 sec; $r_c = 10^{-7}$ Ω-cm^2

Binari et Boos, 1989
(a) $n = 1{,}7 \cdot 10^{17}$ cm^{-3}; implantation ionique de silicium (Si)
Au(100)/AuGe(100)/n-InP
T = 420 °C, t = 30 sec; $r_c = 2{,}0 \cdot 10^{-7}$ Ω-cm^2
(b) $n = 1{,}6 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}; implantation ionique de silicium (Si)
Au(100)/AuGe(100)/n-InP
T = 420 °C, t = 30 sec; $r_c = 1{,}3 \cdot 10^{-7}$ Ω-cm^2

Kuphal, 1981
$n = 8 \cdot 10^{17}$ cm^{-3}; substrat dopé à l'étain (Sn)
(a) Ni(70)/AuGe(300)/n-InP
350 °C < T < 400 °C, t = 2 min; $r_c = 1{,}2 \cdot 10^{-6}$ Ω-cm^2
(b) Ni(70)/AuGe(300)/Ni(40)/n-InP
T = 400 °C, t = 1 min; $r_c = 2{,}3 \cdot 10^{-6}$ Ω-cm^2

Bahir et al., 1987
$n = 2 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}; implantation ionique de silicium (Si)
Au(100)/Ni(30)/AuGe(100)/n-InP
430 °C < T < 450 °C, t = 2 sec; $r_c = 2 \cdot 10^{-7}$ Ω-cm^2

Del Alamo et Mizutani, 1988

$n = 8 \cdot 10^{17}$ cm^{-3}; implantation ionique de silicium (Si)

(a) Ni(30)/AuGe(150)/n-InP

360 °C < T < 460 °C, t = 30 sec; ρ = 0,09-0,16 Ω-mm

(b) Au(200)*/Ti(30)*/Ni(30)/AuGe(150)/n-InP (* déposé après recuit)

360 °C < T < 460 °C, t = 30 sec; ρ = 0,02-0,07 Ω-mm

Dunn et Stringfellow, 1990

$n = 10^{18}$ cm^{-3}; couche dopée au tellurium (Te) réalisée par MOVPE

(a) Au(300)/Ti(50)/Au(80)/Ge(45)/n-InP

Avant recuit, $r_c = 4{,}7 \cdot 10^{-5}$ Ω-cm^2

(1) T = 440 °C, t = 90 sec; $r_c = 1{,}5 \cdot 10^{-6}$ Ω-cm^2

(2) T = 480 °C, t = 90 sec; $r_c = 4 \cdot 10^{-7}$ Ω-cm^2

(b) Au(300)/Ti(50)/Ni(25)/Au(80)/Ge(45)/n-InP

Avant recuit, $r_c = 8{,}1 \cdot 10^{-5}$ Ω-cm^2

(1) 440 °C < T < 480 °C, t = 90 sec; $r_c = 1{,}3 \cdot 10^{-7}$ Ω-cm^2

Erickson et al., 1979

$n = 3 \cdot 10^{16}$ cm^{-3}; substrat dopé

Ni(15)/Au(52)/Ge(25)/n-InP

T = 325 °C, t = 5 min; $r_c = 3 \cdot 10^{-5}$ Ω-cm^2

Contacts à base d'étain (Sn)

Mills et Hartnagel, 1975

$n = 1\text{-}3 \cdot 10^{15}$ cm^{-3}; couche épitaxiale

Ag(255)/Sn(75)/In(20)/n-InP

$r_c < 10^{-4}$ Ω-cm^2

Barnes et Williams, 1981

$n = 3 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}; substrat dopé à l'étain (Sn)

Au(230)/Sn(20)/In(20)/n-InP

380 °C < T < 410 °C, t = 30 sec; $r_c = 1{,}8 \cdot 10^{-6}$ Ω-cm^2

Kuphal, 1981

$p = 8 \cdot 10^{17}$ cm^{-3}; substrat dopé à l'étain (Sn)

(a) Au(120)/Sn(50)/n-InP

T = 400 °C, t = 5 min; $r_c = 1{,}2 \cdot 10^{-4}$ Ω-cm^2

(b) Au(120)/Sn(60)/In(30)/n-InP

T = 400 °C, t = 2 min; $r_c = 3 \cdot 10^{-4}$ Ω-cm^2

Contacts à base de titane (Ti)

Dautremont-Smith et al., 1984

(a) $n = 6 \cdot 10^{17}$ cm^{-3}; substrat dopé au soufre (S)

Pt(150)/Ti(150)/n-InP

Aucun recuit, $r_c = 1{,}8 \cdot 10^{-6}$ Ω-cm^2

(b) $n = 8 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}; substrat dopé au soufre (S)

Pt(150)/Ti(150)/n-InP

Aucun recuit, $r_c = 4 \cdot 10^{-7}$ Ω-cm^2

Katz et al., 1990

(a) $n = 5 \cdot 10^{17}$ cm^{-3}; couche dopée au soufre (S) réalisée par LPE

Pt(75)/Ti(50)/n-InP

Avant recuit, non-ohmique

T = 450 °C, t = 30 sec; $r_c = 1{,}5 \cdot 10^{-5}$ Ω-cm^2

(b) $n = 10^{18}$ cm^{-3}; couche dopée au soufre (S) réalisée par LPE

Pt(75)/Ti(50)/n-InP

Avant recuit, non-ohmique

T = 450 °C, t = 30 sec; $r_c = 5 \cdot 10^{-6}$ Ω-cm^2

(c) $n = 5 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}; couche dopée au soufre (S) réalisée par LPE

Pt(75)/Ti(50)/n-InP

Avant recuit, $r_c = 1{,}1 \cdot 10^{-4}$ Ω-cm^2

T = 450 °C, t = 30 sec; $r_c = 8 \cdot 10^{-7}$ Ω-cm^2

C.2 Résultats expérimentaux sur p-InP

Contacts à base de béryllium (Be)

Temkin et al., 1980

(a) $p = 10^{18}$ cm^{-3}; substrat dopé au zinc (Zn) (LEC)
Au(210)/AuBe(80)/p-InP (Be 3% wt)
T = 420 °C, t = 10 min; $r_c = 8 \cdot 10^{-5}$ Ω-cm^2

(b) $p = 10^{18}$ cm^{-3}; substrat dopé au zinc (Zn) (LEC)
Au(210)/AuBe(80)/Pd(10)/p-InP;
T = 375 °C, t = 10 min; $r_c = 9 \cdot 10^{-5}$ Ω-cm^2

Valois et Robinson, 1982

(a) $p = 1{,}5 \cdot 10^{17}$ cm^{-3}; substrat dopé au zinc (Zn) (LEC)
Au(90)/Be(10)/p-InP;
T = 300 °C, t = 3 min; $r_c = 10^{-3}$ Ω-cm^2

(b) $p = 1{,}5 \cdot 10^{17}$ cm^{-3}; substrat dopé au zinc (Zn) (LEC)
Au(80)/Be(20)/p-InP;
T = 400 °C, t = 10 min; $r_c = 10^{-3}$ Ω-cm^2

(c) $p = 1{,}3 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}; substrat dopé au zinc (Zn) (LEC)
Au(80)/Be(20)/p-InP;
T = 425 °C, t = 30 min; $r_c = 2{,}0 \cdot 10^{-4}$ Ω-cm^2

Hasenberg et Garmire, 1986

$p = 10^{18}$ cm^{-3}; substrat dopé au zinc (Zn)
Au*(100)/Au(100)/Cr(20)/AuBe(80)/p-InP (Be 3% wt) (* déposé après recuit)
T = 410 °C, t = 3 min; $r_c = 5 \cdot 10^{-5}$ Ω-cm^2

Malina et al., 1988

(a) $p = 5{,}5 \cdot 10^{17}$ cm^{-3}; substrat dopé au zinc (Zn)
Au(200)/AuBe(100)/p-InP; (Be 1% wt)
T = 420-430 °C, t = 3-4 min; $r_c = 7 \cdot 10^{-4}$ Ω-cm^2

(b) $p = 2 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}; substrat dopé au zinc (Zn)
Au(200)/AuBe(100)/p-InP; (Be 1% wt)
T = 420-430 °C, t = 3-4 min; $r_c = 4{,}5 \cdot 10^{-4}$ Ω-cm^2

(c) $p = 2 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}; substrat dopé au zinc (Zn)
Au(300)/Cr(50)/AuBe(60)/p-InP; (Be 1% wt)
T = 420-430 °C, t = 3 min; $r_c = 3{,}5 \cdot 10^{-4}$ Ω-cm^2

Piotrowska et al., 1985
$p = 5{,}5 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}; substrat dopé au zinc (Zn)
AuBe(250)/p-InP; (Be 2% wt)
T = 460 °C, t = 3 min; $r_c = 2{,}2 \cdot 10^{-4}$ Ω-cm^2

Contacts à base de zinc (Zn)

Verlangieri et al., 1991
$p = 2 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}; couche épitaxiale
Au(150)/Ni(20)/Au(15)/Zn(12)/Au(15)/p-InP
T = 475 °C, t = 1 min; $r_c = 9{,}5 \cdot 10^{-7}$ Ω-cm^2

Piotrowska et al., 1985
$p = 5{,}5 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}; substrat dopé au zinc (Zn)
Au(274)/Zn(40)/Au(20)/p-InP;
T = 420 °C, t = 3 min; $r_c = 1{,}8 \cdot 10^{-4}$ Ω-cm^2

Kaminska et al., 1986
$p = 5{,}5 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}; substrat dopé au zinc (Zn)
Au(250)/Zn(40)/Au(40)/p-InP;
T = 405 °C, t = 3 min; $r_c = 2 \cdot 10^{-4}$ Ω-cm^2

Cheng et al., 1982
$p = 2 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}; substrat dopé
Au(130)/Cr(30)/Au(10)/Zn(10)/Au(5)/Zn(10)/Au(5)/p-InP
T = 470 °C, t = 1 min; $r_c = 4{,}5 \cdot 10^{-5}$ Ω-cm^2

Kuphal, 1981

$p = 9 \cdot 10^{17}$ cm^{-3}; substrat dopé au zinc (Zn)

(a) Au(120)/Zn(70)/p-InP;

T = 400 °C, t = 2 min; $r_c = 3{,}8 \cdot 10^{-4}$ Ω-cm^2

(b) AuZn(140)/p-InP;

T = 400 °C, t = 2 min; $r_c = 1{,}1 \cdot 10^{-4}$ Ω-cm^2

Malina et al, 1994

$p = 0{,}8\text{-}1{,}0 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}; substrat dopé zinc (Zn)

Au(250)/AuZn(130)/p-InP; (Zn 10% wt)

t_d = 16-25 nm/s, T = 400 °C, t = 1 min; $r_c = 10^{-4}$ Ω-cm^2

Oparaku et al., 1990

$p = 10^{16}$ cm^{-3};

Au(200)/Zn(65)/p-InP

T = 430 °C, t = 3 min; $r_c = 9{,}4 \cdot 10^{-3}$ Ω-cm^2

Annexe D - Courbes de recuit

1) Recuit à T = 350 °C

Durées : t_1 = 15 secondes
t_2 = 2 minutes

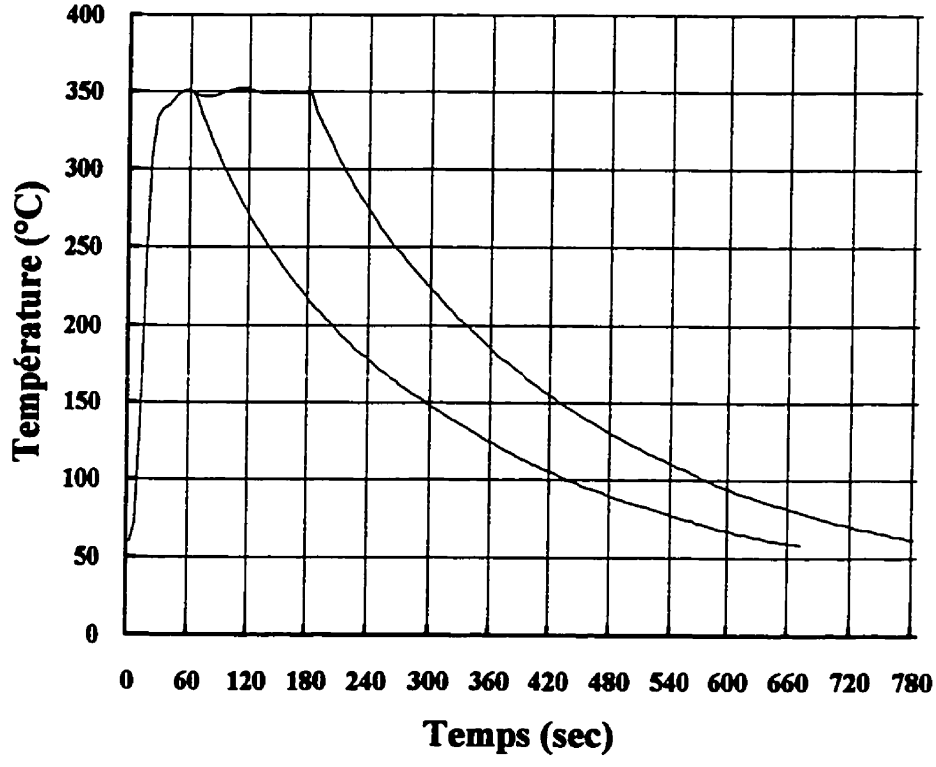


Figure D.1 Courbes des recuits à 350 °C.

2) Recuit à T = 370 °C

Durées : t_1 = 15 secondes
t_2 = 2 minutes

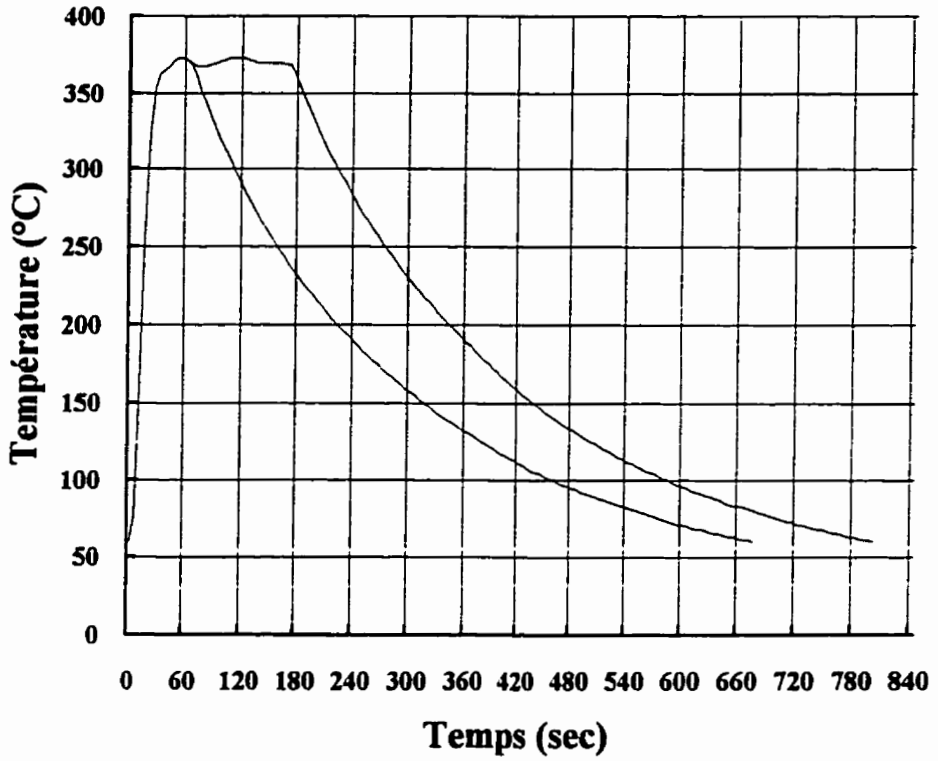


Figure D.2 Courbes des recuits à 370 °C.

3) Recuit à T = 380 °C

Durée : t = 2 minutes

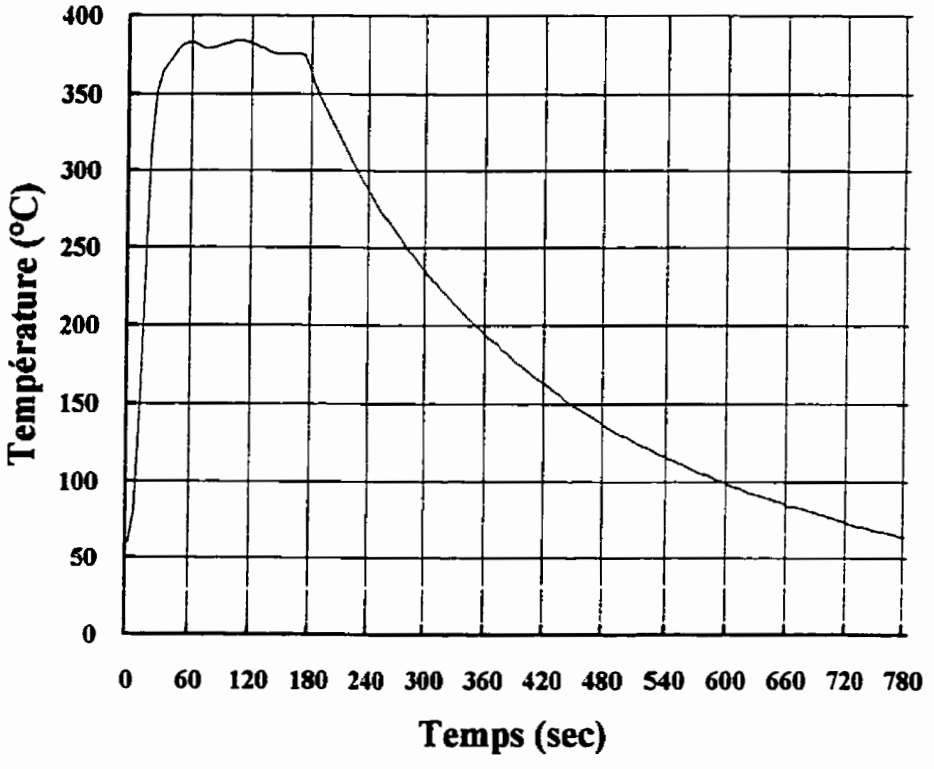


Figure D.3 Courbe du recuit à 380 °C.

4) Recuit à T = 400 °C

Durée : t = 2 minutes

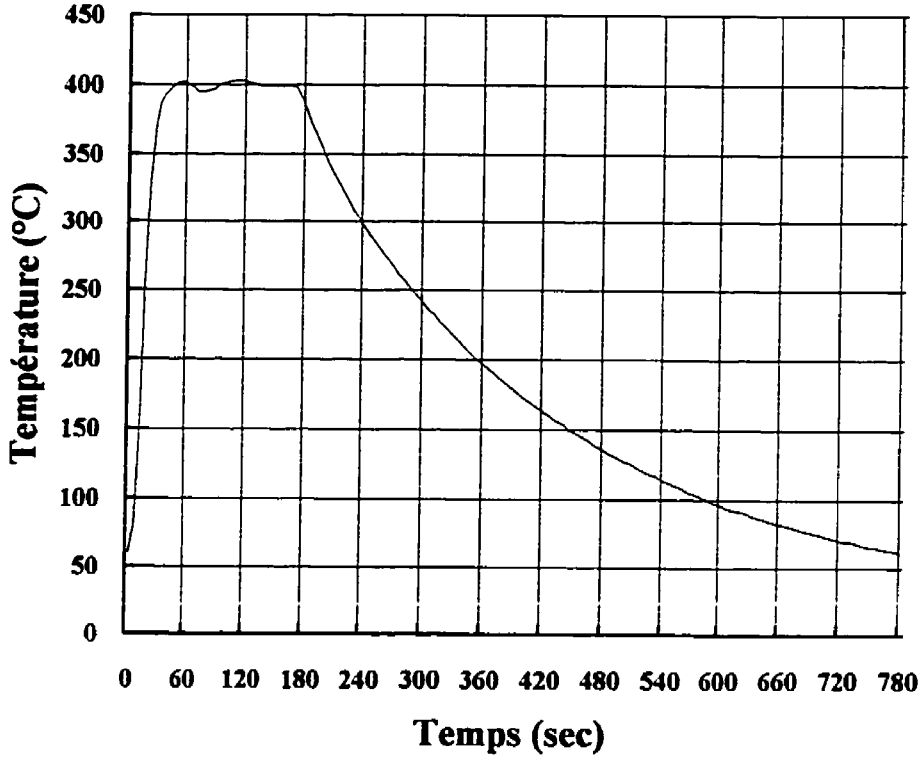


Figure D.4 Courbe du recuit à 400 °C.

5) Recuit à T = 420 °C

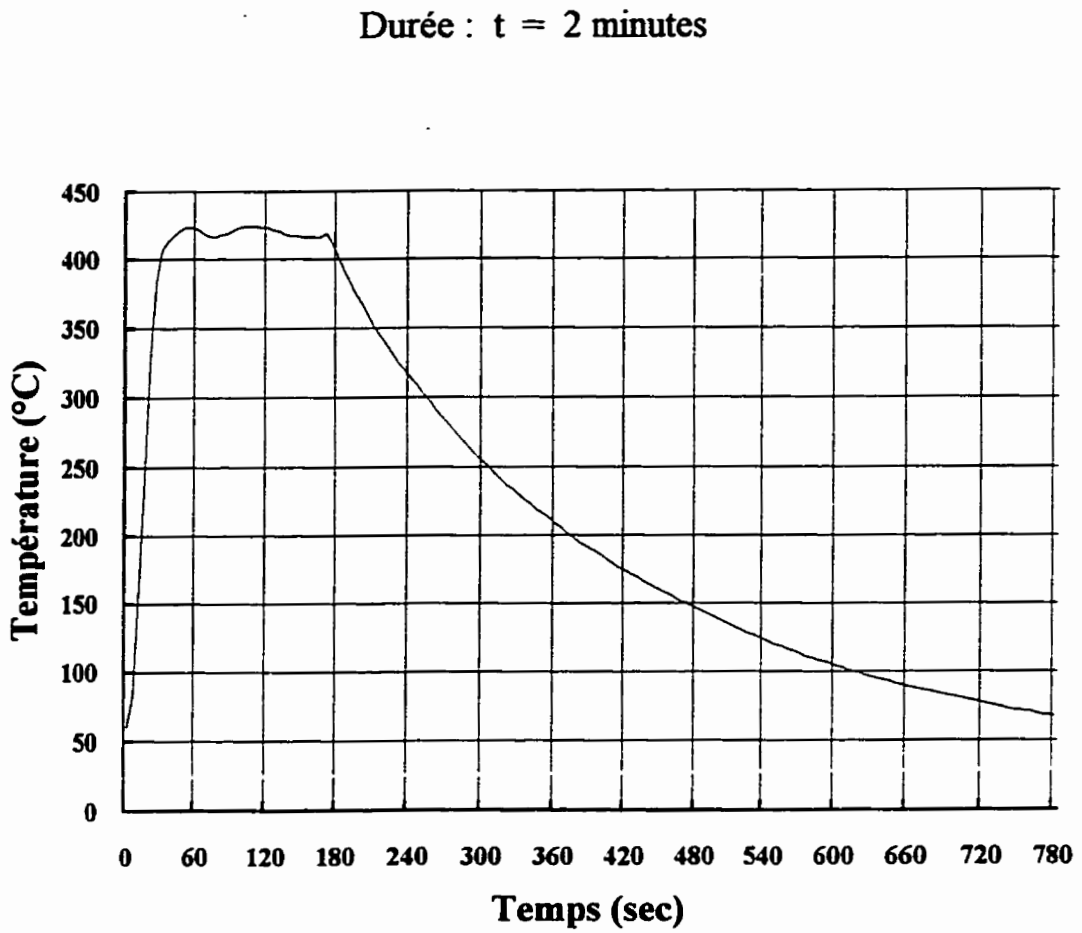


Figure D.5 Courbe du recuit à 420 °C.

6) Recuit à T = 450 °C

Durée : t = 2 minutes

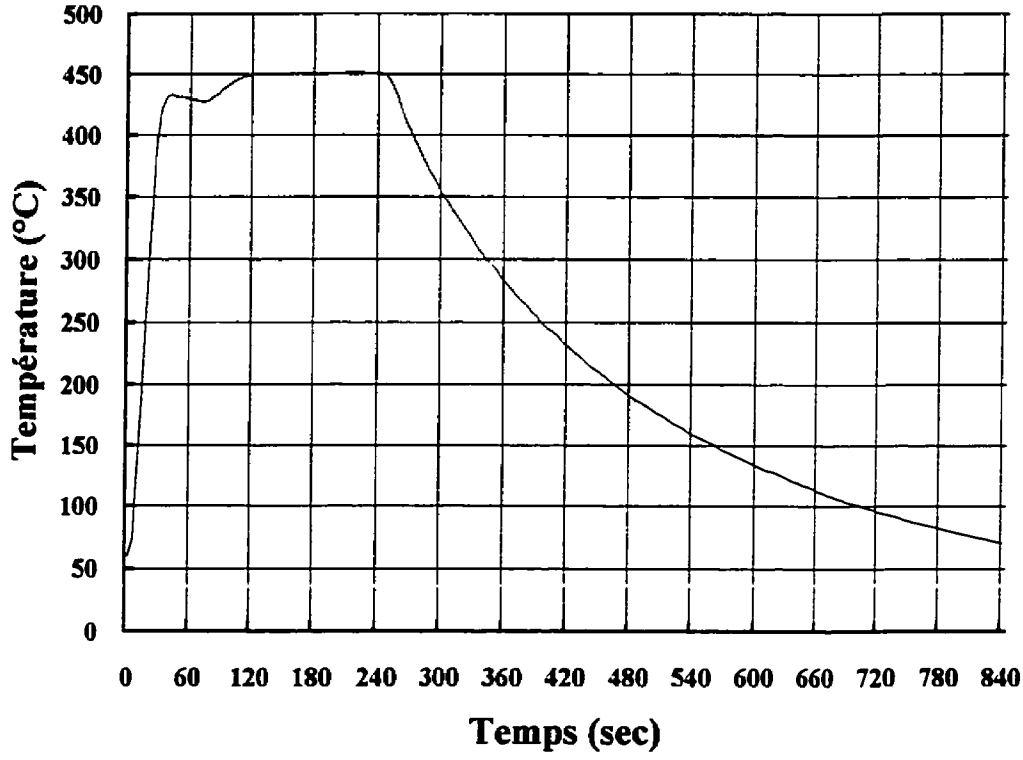
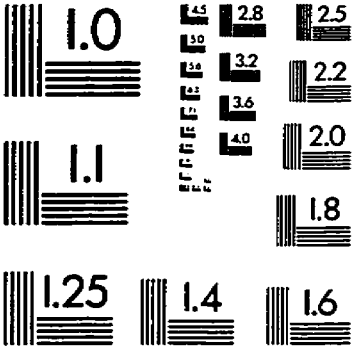
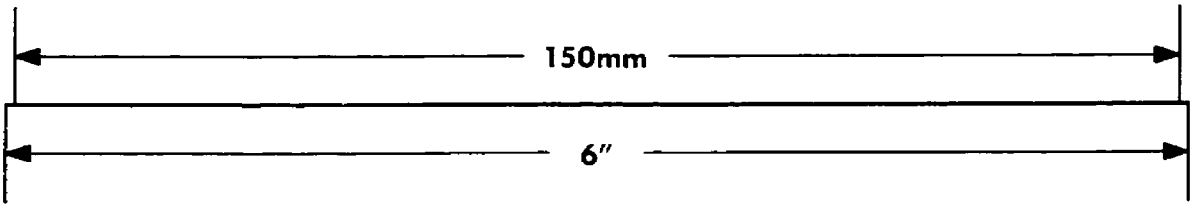


Figure D.6 Courbe du recuit à 450 °C.

IMAGE EVALUATION
TEST TARGET (QA-3)





APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved