

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT : Physique
N° : Ph / MAT/



DOMAINE : Sciences de la matière
FILIERE : Physique
OPTION : Physique Des Matériaux

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par: Bouzina Amina

Intitulé

**Étude de l'effet de l'énergie d'implantation
sur les profils de distribution du dopant
dans le silicium amorphe**

Soutenu le 06/2021 devant le jury composé de:

IBRIR Miloud	Professeur	Université de M'Sila	Président
BOUROUNA Hicham	MCA	l'E.N.S.Bousaada	Rapporteur
BOUSSENDEL Abdelmadjid	MCA	Université de M'Sila	Co-Rapporteur
SAAD ESSAOUD Saber	MCB	Université de M'Sila	Examineur


Année universitaire:2020/2021



Dédicaces

Je Dédie ce modeste travail à :

- ✓ Mes chers parents.
- ✓ À mon cher mari.
- ✓ Mes frères et ma sœurs.
- ✓ Tous mes proches.
- ✓ Mes amis.
- ✓ Mes camarades de promotion.
- ✓ Tous ceux qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.



Bouzina Amina



REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu Tout-Puissant qui m'a donné santé, courage, patience et volonté, ce qui m'a permis de terminer ce travail en cours.

Ce travail a été encadré par M. Hicham BOUROUINA, maître de conférences habilité à l'ENSB de M'sila, conjointement avec M. Abdelmadjid BOUSSENDEL, maître de conférences habilité à l'UMB de M'sila. Je vous remercie pour avoir accepté de diriger ce travail avec une rigueur intellectuelle et une efficacité exceptionnelle.

Je remercie les membres de mon jury, M.SAAD ESSAOUD Saber, maître assistant à l'UMB de M'sila, pour avoir examiné mon travail, et M. Miloud IBRIR, professeur à l'UMB de M'sila, pour avoir accepté de présider ma thèse.

Je remercie les membres de mon jury, pour avoir accepté de présider ma thèse.

Je remercie mes collègues de m'avoir encouragé.

Je remercie également, toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Bouzina Amina



Sommaire

Dédicaces

Remerciements

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction générale.....1

Références.4

CHAPITRE I :
GENERALITES SUR LE DOPAGE PAR IMPLANTATION IONIQUE

1. Introduction.6

2. l'implantation ionique.6

2.1. Principe de l'implantation ionique.7

2.2. Procédés d'implantation.9

2.3. Effets de l'implantation ionique.9

3. Description de l'implanteur ionique.....11

3.1. l'implanteur..... 11

3.2. Principe étape du procédé de l'implantation ionique... 12

3.3- Distribution des ions après implantation... 13

4. Théories de ralentissement et de l'arrêt des ions dans un matériau.....14

4.1. Cas d'un matériau amorphe.	15
4.1.1. Pouvoir d'arrêt nucléaire.....	16
4.1.2. Pouvoir d'arrêt électronique.....	17
4.2. Cas d'un matériau cristallin.	18
5. Distribution des ions en profondeur de la cible.	19
6- conclusion	21
Références.	22

CHAPITRE II :
METHODE DE DOPAGE PAR L'IMPLANTATION IONIQUE

1. Introduction.	25
2. Propriétés du matière à l'état solide.	25
2.1. Solide amorphe	26
2.2. Solide cristallin.....	26
2.3. Structure monocristalline	27
2.4- Structure polycristallin.....	27
3. Données physiques du silicium.....	27
4. Dopage en semi-conducteur	28
4.2.1. Dopage de type n.....	28
4.2.2- Dopage type p.....	28
4.3. Exemple de dopage du Silicium.....	29
5. Principe de l'interaction ion-matière	30

5.1. Principe	30
5.2. Transfert d'énergie	30
6. Distribution des ions implantés en profondeur.	30
7. Modèle de distributions théoriques.	31
7.1. Modèle de distributions Gaussienne.	31
7.2. Modèle de distributions demi-Gaussienne.	32
7.3. Modèle de distributions Pearson IV.....	32
8. La simulation des paramètres par le code SRIM.....	34
8.1. Introduction.....	34
8.2. Principe de fonctionnement.....	35
8.3. Entrées et sorties de SRIM.....	35
9. Conclusion	37
Références.	38

CHAPITRE III:

SIMULATION DES PARAMETRES LIES A L'IMPLANTATION IONIQUE DU BORE ET DU PHOSPHORE DANS LE SILICIUM DOPE AU NITROGENE

1. Introduction.	41
2. Présentation de la structure à implanter	41
3. Paramètres de la simulation.....	41
4. Simulation et interpretation.....	42
4.1. Simulation du pouvoir d'arrêt	42

4.1.1. Pouvoirs d'arrêt du Bore et du phosphore dans la structure $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$	43
4.2. Simulation de création de lacunes.....	47
4.3. Simulation de création de phonons	48
4.4. Simulation de perte d'énergie par ionisation.	49
4.5. Simulation des ions distribution	50
4.6. Simulation des ranges projectiles des ions.....	50
4.7. Simulation de profondeur	51
5. Trajectoire des ions implantés dans la structure	51
6. Profils de concentration du bore dans la couche SiN_x	54
6.1. Influence de la quantité d'azote dans la couche	54
6.2. Influence de l'énergie d'implantation.....	55
7. Production des lacunes.....	57
7.1. Variation de la quantité d'azote dans la couche	57
7.2. Variation de l'énergie d'implantation.....	58
8. Phénomène d'ionisation	59
8.1. Variation de la quantité d'azote dans la couche	59
8.2. Variation de l'énergie d'implantation.....	61
9. Conclusion.	62
Références.	63
Conclusion générale	65
Résumé	
Abstract	
ملخص	

Liste des Figures

N°	Liste des figures	Page
CHAPITRE I :		
NOTIONS ET CONCEPTS SUR LES MICROPOUTRES INTÉGRÉES		
Figure 1.1	Modification de la densité de dislocation par effet longue-portée de l'implantation ionique. $n(z)$: profil de concentration des ions implantés. $\rho(z)$: distribution de la densité de dislocations. $S(0)$ et $S(t)$: positions de la surface de l'échantillon avant et après implantation. [14]	10
Figure 1.2	Schéma d'un implantateur utilisé dans l'industrie de la microélectronique [24].	12
Figure 1.3	Exemple de parcours d'un ion.	13
Figure 1.4	Schématisation des composantes nucléaire et électronique du pouvoir d'arrêt en fonction de la vitesse de l'ion incident [29]. Z_1 est le numéro atomique de l'ion incident ; V_0 est la vitesse de Bohr (elle vaut $\frac{e^2}{h}$ (soit $2.2 \cdot 10^8$ cm/s))	16
Figure 1.5	Schématisation de la trajectoire de l'ion incident dans un canal [31].	19
CHAPITRE II :		
MODELISATION DE COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES MICROPOUTRES INTÉGRÉES		
Figure 2.1	Structures ordonnée et non ordonnée de la matière à l'état solide.	26
Figure 2.2	Structure d'un solide amorphe.	26
Figure 2.3	Structure d'un solide cristallin.	27
Figure 2.4	Structure de silicium polycristallin.	27
Figure 2.5	dopage de type N et dopage de type P dans un semi-conducteur. [5]	29
Figure 2.6	Diagramme de l'énergie cinétique totale du système ion-atome avant et après collision.	30
Figure 2.7	Distribution d'ions dans le silicium implantés à [18].	31
Figure 2.8	simulation de straggling par le logiciel TRIM	34
Figure 2.9	Interface du logiciel SRIM-2008.	36

CHAPITRE III:		
SIMULATION NUMÉRIQUE ET INTER PRÉPATION DE RÉSULTATS		
Figure 3.1	Représentation de la structure à implanter : $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$.	41
Figure 3.2	Simulation des pouvoirs d'arrêt nucléaire et électronique du bore dans la cible $\text{SiN}_{0.02}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, en fonction de l'énergie incidente des ions	43
Figure 3.3	des pouvoirs d'arrêt nucléaire et électronique du bore dans la cible $\text{SiN}_{0.06}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, en fonction de l'énergie incidente des ions.	44
Figure 3.4	Simulation des pouvoirs d'arrêt nucléaire et électronique du bore dans la cible $\text{SiN}_{0.1}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, en fonction de l'énergie incidente des ions.	44
Figure 3.5	Simulation des pouvoirs d'arrêt nucléaire et électronique du phosphore dans la cible $\text{SiN}_{0.02}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, en fonction de l'énergie incidente des ions.	45
Figure 3.6	Simulation des pouvoirs d'arrêt nucléaire et électronique du phosphore dans la cible $\text{SiN}_{0.06}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, en fonction de l'énergie incidente des ions.	45
Figure 3.7	Simulation des pouvoirs d'arrêt nucléaire et électronique du phosphore dans la cible $\text{SiN}_{0.1}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, en fonction de l'énergie incidente des ions.	45
Figure 3.8	variation de perte d'énergie pour la création de lacunes pour les ions de bore et le phosphore dans la cible $\text{SiN}_{0.1}/\text{SiO}_2/\text{Si}$	48
Figure 3.9	variation de perte d'énergie pour la création de phonons pour les ions de dopage de type N et de type P dans la matrice $\text{SiN}_{0.1}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ en fonction des énergies cinétiques des ions.	49
Figure 3.10	variation de perte d'énergie pour la création d'ions pour les ions de dopage de type N et de type P dans la matrice	49

	SiN _{0.1} /SiO ₂ /Si en fonction des énergies cinétiques des ions.	
Figure 3.11	variation des ions distribution pour les ions de dopage de type N et de type P dans la matrice SiN _{0.1} /SiO ₂ /Si en fonction des énergies cinétiques des ions.	50
Figure 3.12	Variation du range projectile des ions de dopage N et P en fonction des leurs énergies cinétiques dans la cible SiN _{0.1} /SiO ₂ /Si	50
Figure 3.13	Variation du profondeur des ions de dopage N et P en fonction des leurs énergies cinétiques dans la cible SiN _{0.1} /SiO ₂ /Si	51
Figure 3.14	Simulation de la trajectoire du bore dans la structure SiN _x /SiO ₂ /Si, pour des proportions de l'azote de 2%, 6%, et 10%, avec une énergie de 15 keV	52
Figure 3.15	Simulation de la trajectoire du phosphore dans la structure SiN _x /SiO ₂ /Si, pour des proportions de l'azote de 2%, 6%, et 10%, avec une énergie de 15 keV	52
Figure 3.16	Simulation de la trajectoire du bore dans la structure SiN _{0.1} /SiO ₂ /Si, pour différentes énergies: (a) E=5 keV, (b) E=15 keV, (c) E=25 keV	53
Figure 3.17	Simulation de la trajectoire du phosphore dans la structure SiN _{0.04} /SiO ₂ /Si, pour différentes énergies: (a) E=5 keV, (b) E=15keV, (c) E=25keV	53
Figure 3.18	Simulation des profils de distribution du bore dans la structure SiN _x /SiO ₂ /Si, pour les taux d'azote de 2%, 6%, et 10%, avec une énergie de 15 keV .	54
Figure 3.19	Simulation des profils de distribution du phosphore dans la structure SiN _x /SiO ₂ /Si, pour les taux d'azote de 2%, 6%, et 10%, avec une énergie de 15 keV	55
Figure 3.20	Simulation des profils de distribution du bore dans la structure SiN _{0.1} /SiO ₂ /Si, en fonction de l'énergie d'implantation : E=5 keV, E=15 keV, E=25 keV.	56
Figure 3.21	Simulation des profils de distribution du phosphore dans la structure SiN _{0.1} /SiO ₂ /Si, en fonction de l'énergie	56

	d'implantation E=5 keV, E=15 keV, E=25 keV.	
Figure 3.22	Nombre de lacunes créées par implantation du bore en fonction de la quantité d'azote dans la couche SiN _x .	57
Figure 3.23	Nombre de lacunes créées par implantation du phosphore en fonction de la quantité d'azote dans la couche SiN _x .	58
Figure 3.24	Nombre de lacunes créées par implantation du bore dans la couche SiN _{0,1} en fonction de l'énergie incidente des ions : E=5keV, E=15 keV, E=25 keV.	58
Figure 3.25	Nombre de lacunes créées par implantation du phosphore dans la couche SiN _{0,1} en fonction de l'énergie incidente des ions : E=5keV, E=15 keV, E=25 keV.	59
Figure 3.26	Perte d'énergie par le phénomène d'ionisation dans la couche SiN _x par les ions projectiles et les atomes de recul du bore : Influence de la quantité d'azote	60
Figure 3.27	Perte d'énergie par le phénomène d'ionisation dans la couche SiN _x par les ions projectiles et les atomes de recul du phosphore : Influence de la quantité d'azote	60
Figure 3.28	Perte d'énergie par le phénomène d'ionisation du bore dans la couche SiN _{0,1} par les ions projectiles et les atomes de recul : effet de la variation de l'énergie d'implantation : E=5 keV, E=15 keV, E=25 keV.	61
Figure 3.29	Perte d'énergie par le phénomène d'ionisation du phosphore dans la couche SiN _{0,1} par les ions projectiles et les atomes de recul : effet de la variation de l'énergie d'implantation : E=5 keV, E=15 keV, E=25 keV.	62



Liste des Tableaux

N°	Liste des Tableaux	Page
CHAPITRE II : MODELISATION DE COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES MICROPOUTRES INTÉGRÉES		
Tableau 2.1	Paramètres d'entrée et de sortie de TRIM.	37
CHAPITRE III: SIMULATION NUMÉRIQUE ET INTER PRÉPATION DE RÉSULTATS		
Tableau 3.1	TRIM data différents paramètres du bombardement ionique de l'ion bore de dopage $\text{SiN}_{0.1}/\text{SiO}_2$	46
Tableau 3.2	TRIM data différents paramètres du bombardement ionique de l'ion phosphore de dopage $\text{SiN}_{0.1}/\text{SiO}_2$	47

Introduction générale

Introduction générale

Dans le domaine des semi-conducteurs , l'ajout d'une petite quantité d'impuretés à une substance pure aboutit à une modification de sa conductivité, c'est le principe du dopage. Les propriétés des semi-conducteurs concernent en grande partie le nombre de porteurs de charge qu'ils possèdent. Ces porteurs sont des électrons ou des trous . Le dopage d'un matériau consiste à faire entrer des atomes d'un autre matériau dans sa matrice. Ces atomes tiennent place des certains atomes d'origine, provoquant ainsi plus d'électrons ou de trous[1]. Il y a beaucoup des méthodes de dopage des matériaux: le dopage par transmutation nucléaire, le dopage laser et le dopage par implantation ionique. L'implantation ionique représente la technologie la plus développée. On va traiterons de ce dernier. Cette technique qui porte le nom (implantation ionique) fera l'objet d'une simulation par le logiciel TRIM (Transport and Range of Ions in Mater) [2]

Le bombardement d'une surface solide par des ions primaires s'accompagne d'une séquence d'interactions au cours desquelles les ions primaires transfèrent tout ou une partie de leur énergie. L'ion incident peut parcourir dans le solide une certaine distance, dissiper son énergie avant d'être finalement arrêté ou éjecté du solide. Dans ce travail , il est question d'étudier deux types d'interactions (pouvoir d'arrêt électronique et nucléaire) en utilisant le logiciel TRIM (Transport and Range of Ions in Mater) élaboré par le savant allemande James Ziegler. [3]

La technique d'implantation ionique est devenue un outil très utile dans le domaine de la fabrication de dispositifs à semi-conducteurs, elle représente un moyen de modification des propriétés de surface pour une grande variété de matériaux. Elle est utilisée dans plusieurs domaines, en particulier, en microélectronique, la technique d'implantation ionique est une méthode de dopage et de fabrication de semi-conducteur intéressant tel que le nitrure de silicium (SiN) [4]. Cette technique est employée aussi dans d'autres domaines tels que les céramiques, les métaux et les polymères.

L'implantation ionique consiste à introduire les atomes ionisés d'un matériau, avec suffisamment d'énergie, pour pénétrer dans l'échantillon cible (en général une plaquette). Elle permet un contrôle précis de la quantité totale d'atomes implantés (dose d'implantation ou fluence) et du profil de concentration des ions implantés. Elle permet aussi de changer les propriétés chimiques et structurales de la cible (amorphisation partielle ou générale de la cible qui nécessite un recuit thermique de recristallisation).[5]

L'implantation ionique est appliquée dans plusieurs domaines tels que la métallurgie, les céramiques, la biologie, etc. Son principe se résume à bombarder la cible par des ions accélérés lesquels vont pénétrer dans les couches superficielles avec une quantité contrôlable [6,7]. Elle est considérée comme technique de surface puisque la profondeur de pénétration des ions est de l'ordre du micromètre.

Les éléments les plus utilisés pour le dopage du silicium sont le phosphore, le bore. Ce dernier, permettant le dopage de type n, est particulièrement intéressant pour la fabrication des jonctions superficielles (*i.e.* profondeur de pénétration inférieure à 0.1 μ m) [8,9]. Dans le cadre de ce travail, on se propose d'étudier le comportement des ions d'antimoine implantés dans le silicium. Notre investigation sera constituée de deux parties essentielles. La première sera réalisée par simulation pour prévoir les différents phénomènes ayant lieu lors des interactions ion-matière (Si). Quant à la seconde étape, elle sera consacrée à l'expérience qui nous permettra de voir le comportement réel de l'antimoine dans le silicium. Pour mener à bien notre travail, nous avons structuré ce mémoire comme suit :

Dans le premier chapitre, nous allons donner des généralités sur le dopage par l'implantation ionique. Nous commencerons par le principe de l'implantation ionique, procédés d'implantation ionique, les effets de l'implantation ionique, description de l'implanteur ionique, distribution des ions après l'implantation, nous exposerons les théories de ralentissement et de l'arrêt des ions dans un matériau et nous terminerons par la distribution des ions en profondeur de la cible.

Introduction générale

Le second chapitre sera consacré à les données physique de silicium, nous allons donner des généralités sur les semi-conducteurs et en particulier leur dopage par bombardement ionique, les deux types de dopage N et P correspondent respectivement aux injections des électrons et des trous dans la matrice d'un semi conducteur, principe de l'interaction ion-matière, modèle de distribution théoriques. Enfin, nous donnons une brève description du programme de simulation SRIM /TRIM .

Dans un troisième chapitre on utilise le logiciel TRIM permettant de simuler les interactions ions-matière. Les phénomènes pouvoirs d'arrêts nucléaires et électroniques , les lacunes (vacancies) créés par les faisceaux d'ions, les distances parcourues par les ions dans leurs trajectoires, les phonons ; la perte d'énergie des ions seront traités. On s'intéressera à leurs courbes de variation avec les énergies cinétiques des ions incidents sur la surface de différents composants semi-conducteurs de notre choix. On donnera enfin les résultats et la discussion sur cette simulation qui sera présentée sous forme de tableaux et de courbes pour les deux types de dopage N et P représentés par leurs éléments respectifs de bore et de phosphore.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale où les points essentiels seront soulevés. Aussi, nous proposerons les perspectives possibles pour ce travail.

Références

- [1] Conducteurs – semi-conducteurs - supraconducteur, thème les matériaux, <http://spcts.e-monsite.com/medias/files/14-t3-conducteurs-semi-conducteurs.pdf>
- [2] J F. Ziegler, U. Littmark, and J. P. Biersack, The Stopping and Range of Ions in Solids, The Stopping and Ranges of Ions in Matter (logiciel) (2006)
- [3] N. Abdi, Modélisation des propriétés électriques du GaAs dopé par implantation ionique, mémoire de magistère, Université de Tébessa (2012)
- [4] A. Bouguerra, thèse de Doctorat Contribution à l'étude de l'implantation des ions de carbone dans le silicium, Université Mentouri Constantine, Algérie (2016)
- [5] S. Sato, H. Sai, T. Ohshima, M. Imaizumi, K. Shimazaki, and M. Kondo, "Anomalous enhancement in radiation induced conductivity of hydrogenated amorphous silicon semiconductors," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. (2012)
- [6] A. Bensaada, Technologie des Semi-conducteurs, Office des Publications Universitaires, Alger, (1994).
- [7] S. Blanqué, "Optimisation de l'implantation ionique et du recuit thermique pour SiC", Thèse de doctorat, Univ. Montpellier II, (2004).
- [8] J.F. Ziegler, Ion Implantation: Science and Technology, Academic press, San Diego, (1988).
- [9] J.D. Plumm, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 438, (1997).

CHAPITRE I
GENERALITES SUR LE DOPAGE
PAR IMPLANTATION IONIQUE

1 – Introduction

Pour améliorer les propriétés physiques, chimiques ou mécaniques de la matière solide il y a des techniques qu'on peut utiliser parmi elles le dopage par l'implantation ionique.

Le dopage est une technique importante dans les traitements apparent et interne des matériaux pour la fabrication des composants optiques et électroniques. Le dopage peut être réalisé par de nombreux procédés technologiques. Il est, le plus souvent, réalisé par l'implantation ionique présentant des avantages indéniables par rapport aux autres procédés (diffusion thermique par exemple).

L'implantation ionique est une technique utilisée principalement dans l'industrie des semi-conducteurs. Actuellement, elle est appliquée dans plusieurs domaines tels que la métallurgie, les céramiques, la biologie, etc. Son principe se résume à bombarder la cible par des ions accélérés lesquels vont pénétrer dans les couches superficielles avec une quantité contrôlable.

Nous présentons dans la première chapitre un aperçu bibliographique général sur la technique en question (*i.e.* l'implantation ionique). Plusieurs paramètres seront envisagés à savoir : les avantages et inconvénients; les principes physiques ; la description d'un implantateur ionique, etc. En dernier lieu, nous allons envisager la théorie des ralentissement et de l'arrêt des ions dans un matériau , et la distribution des ions en profondeur de la cible .

2.l'implantation ionique

L'implantation ionique est un processus technologique qui consiste à introduire des atomes chargés (les projectiles) dans un matériau (la cible). En communiquant aux ions suffisamment d'énergie, ces projectiles peuvent pénétrer au-delà de la région superficielle de la cible. La tension d'accélération des ions peut être de quelques keV (implantation plasma) à quelques MeV (implantation haute énergie), la dose est généralement comprise entre 10^{10} et 10^{16} ions/cm² [1,2].

Cette technique (*i.e.* l'implantation ionique) est largement employée dans l'industrie électronique. Elle a été introduite dès 1951, grâce à Schockley (un des

CHAPITRE I: Généralités sur le dopage par implantation ionique

inventeurs du transistor), pour remplacer le processus classique (diffusion à hautes températures) de dopage des semi-conducteurs [3].

Comme tout processus technologique, l'implantation ionique possède aussi bien des avantages que des inconvénients. Les principaux avantages de l'implantation ionique sont :

- * le contrôle précis du nombre et de la profondeur de pénétration des ions.
- * la solubilité limite peut être largement dépassée (vu que le processus est athermique c'est-à-dire qu'il n'est pas soumis aux lois de la thermodynamique).
- * possibilité d'introduction d'éléments non miscibles dans la cible.
 - * le procédé est très simple .
 - * les paramètres à gérer sont très peu nombrables: ils sont tous facilement reproductibles et contrôlables par un courant ou une tension.
 - * la méthode s'applique pratiquement à n'importe quel type de substrat et à n'importe quel type d'impureté [1,4].
 - * la quantité totale d'ions introduits peut être aisément mesurée.
 - * la technique est réalisée à plus basse température que la diffusion.
 - * il n'y a pas de variation dimensionnelle (*i.e.* on peut l'appliquer directement sur des pièce finies).
 - * La pénétration latérale des ions dans le substrat est limitée (réduite) [3].

Les principaux désavantages de l'implantation ionique sont:

- * endommagement inévitable de la cible durant la ralentissement des ions par la collision en cascade avec les atomes cibles.
- * les surfaces à traiter doivent être externes ou en vue directe du faisceau.
- * les épaisseurs à traiter doivent être faibles ($<1\mu\text{m}$).
- * l'équipement de la technique est très coûteux (selon le modèle, le prix d'une machine neuve oscille entre 3 et 6 millions de dollars) [4].

2.1. Principe de l'implantation ionique

L'implantation ionique est un procédé inventé à la fin des années 1940 par William Shockley. Cette technique consiste à implanter des ions dans un matériau cible

afin de modifier ses propriétés. Initialement développée pour doper les semi-conducteurs, c'est au cours des années 1970 que l'implantation ionique a été détournée de son utilisation initiale pour améliorer les propriétés des métaux et des polymères.

Le principal intérêt de cette technique est qu'elle permet de s'affranchir des lois de la thermodynamique et de former de nouvelles phases métastables qu'il aurait été impossible de former par les moyens de traitement de surfaces conventionnels. Ces nouvelles phases induisent une modification des propriétés du matériau implanté. Ainsi, il est possible d'augmenter la résistance à la corrosion, de réduire le coefficient de frottement ou d'augmenter la dureté et la résistance à l'usure d'un matériau. En raison du grand nombre de nouvelles propriétés qu'il est potentiellement possible d'obtenir, l'industrie nucléaire et l'aéronautique ont été les premiers secteurs à s'être intéressés à cette technologie.

Actuellement, de nombreux autres secteurs y ont recours pour améliorer leurs produits : biomédical, outillage, automobile...

Les principales étapes du procédé d'implantation ionique sont :

- **L'ionisation** : l'élément à implanter est introduit (généralement sous forme gazeuse) dans une chambre d'ionisation. La technique la plus répandue pour ioniser le gaz consiste à émettre des électrons grâce à un filament. Ceux-ci vont entrer en collision avec les atomes du gaz et les ioniser, ce qui créera un plasma, c'est-à-dire un gaz ionisé électriquement neutre et constitué de molécules, d'atomes, d'ions et d'électrons. Le plasma obtenu peut, dans certains cas, être confiné magnétiquement à l'aide d'aimants permanents ou d'électro-aimants.

- **L'extraction et l'accélération** : un champ électrique permet d'extraire les ions de la source et de les accélérer vers le matériau cible. La majorité des implanteurs utilisent également un séparateur de masse afin de sélectionner un seul type d'ion à implanter.

- **L'implantation** : les ions pénètrent le matériau cible et perdent progressivement leur énergie cinétique jusqu'à immobilisation. Cette implantation va induire des

Modifications structurales dans le matériau cible, ce qui va modifier les propriétés de celui-ci.

2.2. Procédés d'implantation

L'implantation ionique a connu une industrialisation rapide et à grande échelle dans le secteur de l'industrie électronique, en raison de son caractère indispensable. En effet, ce procédé est utilisé pour doper les semi-conducteurs et ainsi leur conférer des propriétés ajustables.

Dès 1973, Hartley et Dearnaley est démontré l'intérêt de l'implantation ionique pour le traitement des métaux : ils prouvent que l'implantation d'azote améliore les propriétés tribologiques des aciers. Cependant, les implantateurs alors existants sont assez complexes (Figure 1.2), et tout le monde admet qu'une simplification des équipements est indispensable afin de favoriser l'industrialisation du procédé. Ainsi, il est rapidement démontré [5] que le spectromètre de masse permettant une sélection des ions n'est pas nécessaire lors du traitement des aciers. Bien que les premières solutions industrielles de traitement des métaux par implantation ionique voient le jour, la technologie reste peu utilisée, notamment à cause de la fragilité des sources d'ions. En effet, pour produire les ions, les sources utilisent un filament ayant une durée de vie réduite, et l'intensité des faisceaux d'ions obtenus reste insuffisante (quelques dizaines de nA) pour implanter efficacement des pièces métalliques en un temps réduit. Cette technologie, actuellement utilisée par de nombreuses entreprises, est particulièrement adaptée aux traitements industriels car il est possible d'implanter uniformément un grand nombre de pièces à la fois.

2.3 Effets de l'implantation ionique

En raison de la formation de nouvelles phases, de précipités, ou de défauts, différents effets peuvent être obtenus par implantation ionique dans les métaux. Les principaux sont :

- *L'amélioration des propriétés tribologiques* : il s'agit probablement de l'effet le plus étudié, car depuis le milieu des années 1970 [6,7,8], on sait que l'implantation ionique améliore les propriétés tribologiques.

- *L'amélioration de la résistance à la corrosion* : dès le début des années 1980, cet effet de l'implantation ionique est mis en évidence, notamment par l'implantation

d'azote ou de chrome dans des aciers [5]. D'autres types d'ions ont le même effet, comme le phosphore ou le tantale, par exemple [9]. De plus, l'implantation ionique d'azote permet de nitrurer des aciers qui ne peuvent l'être par les techniques conventionnelles.

- *L'amélioration des propriétés mécaniques* : en 1981, Bakhru [10] démontre qu'il est possible d'augmenter la résistance à la fatigue du cuivre en y implantant du néon. Depuis, de nombreux auteurs ont étudié les effets de l'implantation ionique sur les propriétés mécaniques des métaux, mais la plupart ont évalué ces effets par des mesures de micro et nano-dureté [11,12]. Selon le type d'ion implanté dans le matériau, deux mécanismes de durcissement ont été mis en évidence.

Ainsi, en 1992, Didenko et al [13] mettent en évidence un effet longue-portée de l'implantation ionique : en implantant du nickel et du hafnium dans du cuivre, la densité de dislocations augmente d'un facteur 15 à 40, et ce, à une profondeur plus importante que la profondeur moyenne d'implantation (Figure 1.1).

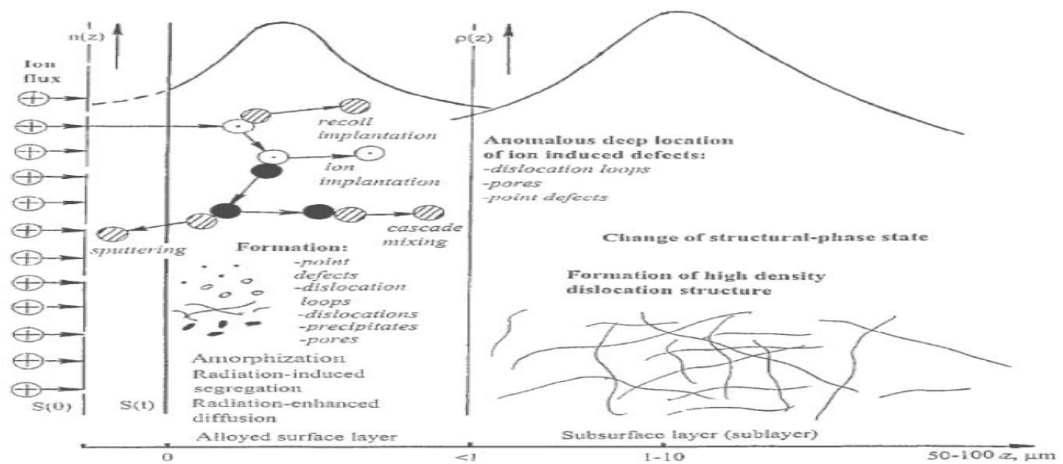


Figure 1.1 : Modification de la densité de dislocation par effet longue-portée de l'implantation ionique. $n(z)$: profil de concentration des ions implantés. $\rho(z)$: distribution de la densité de dislocations. $S(0)$ et $S(t)$: positions de la surface de l'échantillon avant et après implantation. [14]

- *Autres effets* : l'implantation ionique dans des métaux permet également de modifier d'autres caractéristiques, comme les propriétés d'adhésion [15,16] ou les propriétés électriques et optiques [16]. De plus, les travaux concernant les effets de l'implantation ionique ne se limitent pas aux métaux, puisque de nombreuses études concernent l'implantation dans des polymères [17,18,19] ou des céramiques [20,21]. Xu et al ont même amélioré les propriétés tribologiques du diamant en y implantant de l'azote [22].

3. Description de l'implanteur ionique

3.1. l'implanteur

En pratique, l'implanteur est une machine qui fournit des ions (Figure 1.2). Ces derniers doivent avoir une masse et une dose déterminée ainsi qu'une énergie bien précise. La création des ions a lieu dans la source à partir de composés gazeux ou d'éléments métalliques vaporisés ou pulvérisés [23].

A ce stade, les ions sont délivrés à partir d'un plasma constitué d'un gaz contenant l'espèce à implanter. Ce gaz est ionisé par des électrons lesquels sont émis par un filament chauffé par effet Joule. A la sortie de la chambre d'ionisation, on applique un champ électrostatique primaire qui permet l'extraction des ions.

La source émet toujours des quantités non négligeables d'ions non désirés. Pour pallier à ce problème, une opération de séparation par un champ magnétique est appliquée. Elle permet la sélection et l'obtention d'ions possédant la masse et l'énergie spécifiées. Après la purification et l'accélération du faisceau par un fort champ électrique, les ions traversent des systèmes de focalisation et de balayage pour assurer l'homogénéité de la dose au niveau de la cible. Le principe de fonctionnement d'un implanteur ionique est représenté sur la figure (1.2)

L'implanteur est en pratique un accélérateur d'ions. Il est composé des parties suivantes visibles sur la figure (1.2) :

- génération des ions à partir d'une source solide, liquide ou gazeuse dans un plasma excité à 25kV.

- sélection des ions par champ magnétique effectuant le tri par le rapport masse sur charge.
- accélération des ions à l'énergie d'implantation souhaitée.
- mise en forme du faisceau d'ions par des lentilles électrostatiques.
- dispositif de balayage en x et y afin d'implanter de façon uniforme les plaquettes. Les fréquences de balayage sont telles qu'il y ait en permanence glissement de la courbe de Lissajous associée.
- chambre d'implantation.

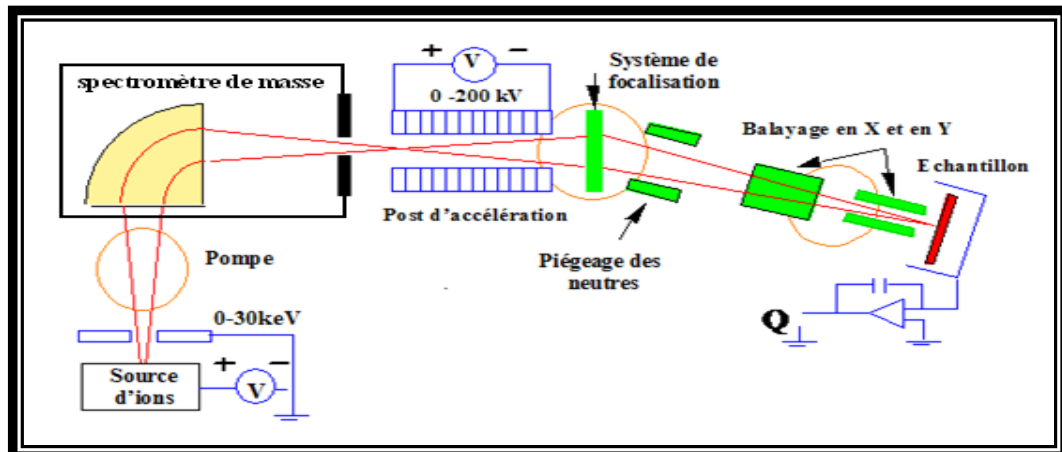


Figure 1.2 : Schéma d'un implantateur utilisé dans l'industrie de la microélectronique [24].

3.2 . Principe étape du procédé de l'implantation ionique :

Lors de l'implantation, un phénomène peut être important : la pulvérisation. Sous l'effet des collisions élastiques, des atomes de la surface du matériau cible peuvent être éjectés dans le vide, créant un phénomène d'érosion. Selon la nature et l'énergie des ions implantés, ce phénomène peut être plus ou moins accentué, et induire une modification du profil de concentration. Les principales étapes du procédé de l'implantation ionique sont [25] :

- **L'ionisation** : l'élément à implanter est introduit (généralement sous forme gazeuse) dans une chambre d'ionisation.

- **L'extraction et l'accélération** : un champ électrique permet d'extraire les ions de la source et de les accélérer vers le matériau cible.

Lors de l'implantation, différentes interactions entre les ions implantés et le matériau cible ont lieu. Au début de leur parcours dans le matériau cible, les ions implantés, en raison de leur énergie cinétique élevée, vont avoir une trajectoire quasiment rectiligne. Ils vont perdre progressivement de l'énergie en interagissant avec les électrons du matériau cible (on parle alors de collisions inélastiques). Une fois que les ions implantés ont perdu la majeure partie de leur énergie et de leur vitesse, ceux-ci vont alors interagir avec les atomes par collisions élastiques.

3.3- Distribution des ions après implantation

La principale modification du matériau est le changement de composition de la zone irradiée avec pour conséquence éventuellement la formation de solutions solides proches de la structure originale ou la formation de nouvelles structures. La dose d'implantation, également nommée fluence, correspond au nombre total d'ions implantés par unité de surface. La séquence de collisions nucléaires, qui dévie l'ion de sa trajectoire initiale, est un processus stochastique. Par conséquent, la position finale de l'ion est donnée par une distribution de probabilité de type gaussien dont un exemple est représenté sur la figure (1.3).

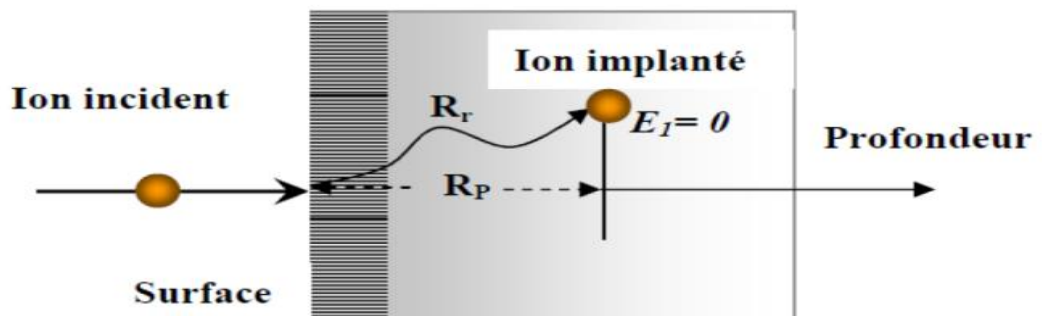


Figure : 1.3 Exemple de parcours d'un ion.

En dépit de la précision avec laquelle la dose peut être contrôlée, l'implantation ionique est un processus aléatoire, car chaque ion suit une trajectoire aléatoire. Les ions

incidents vont perdre leur énergie par chocs successifs avec les atomes de la cible. Ceci explique d'une part, la dispersion des trajectoires et d'autre part, que l'on définisse statistiquement une profondeur moyenne de pénétration. La statistique qui convient assez bien est gaussienne. Nous définissons ainsi deux paramètres:

* **Le parcours moyen projeté R_p** : est la profondeur où les ions implantés s'arrêtent avec un maximum de concentration avec un écart type la déviation standard) qui caractérise la répartition statistique des ions en profondeur autour de R .

* **La déviation latérale (l'écart moyen latéral) ΔR** : est le parcours projeté sur le plan perpendiculaire à la direction d'incidence (perpendiculaire à la direction d'implantation), il caractérise la dispersion latérale des ions.

4. La théorie des ralentissement et de l'arrêt des ions dans un matériau

Lors de l'implantation ionique dans un solide, quatre phénomènes physiques très différents peuvent avoir lieu par interaction de la particule chargée incidente avec les électrons et les noyaux des atomes cibles. D'après la figure 2, ces phénomènes peuvent être :

* des chocs élastiques ayant lieu par transfert de la quantité de mouvement aux atomes-cibles .

* des chocs inélastiques par excitation-ionisation de la cible.

* une production de photons.

* apparition de diverses réactions nucléaires.

La probabilité d'apparition de chacun de ces phénomènes dépend des caractéristiques de la particule incidente telles que la masse, la charge et l'énergie. Cependant, on doit signaler que les deux derniers processus se déroulent lors des implantations à très hautes énergies (généralement supérieures au GeV) [26].

* la pulvérisation de la cible ayant lieu en surface (*i.e.* des noyaux peuvent être éjectés du matériau) .

* la rétrodiffusion des ions incidents ayant lieu si la masse de la particule incidente est trop faible par rapport à la masse de l'atome cible. La particule incidente peut alors rebondir sur les noyaux du solide jusqu'à ce qu'elle sera rétrodiffusée .

* éjection de produits des réaction nucléaires : électron, photon, particule légère et/ou lourde.

4.1. Cas d'un matériau amorphe

L'un des facteurs principaux qui joue un rôle important dans les théories de l'arrêt des ions, dans un matériau, est la perte d'énergie par unité de profondeur (*i.e.* le pouvoir d'arrêt). Il traduit la diminution de l'énergie cinétique pendant la pénétration des ions dans le solide. Selon la théorie LSS (Lindhard, Scharff et Schiott) [33,34], deux processus décrivent cette perte d'énergie. En fonction du domaine d'énergie utilisé et de la masse atomique de l'ion, l'un des deux processus devient dominant par rapport à l'autre. Le premier processus est la collision nucléaire (S_n) traduisant le choc élastique direct des ions avec les atomes du matériau. Quant au deuxième, il est dit collision électronique (S_e). Il décrit l'interaction inélastique des ions avec le cortège électronique des atomes cibles. La superposition des deux processus donne le pouvoir d'arrêt total (S) qui est proportionnel à la perte énergétique de l'ion rapportée à la distance parcourue

($\frac{dE}{dX}$) Le pouvoir total $S(E)$ a pour expression :

$$S(E) = \frac{1}{N} \frac{dE}{dX} = S_n + S_e \quad (1)$$

Où

S_n : le pouvoir d'arrêt nucléaire.

S_e : le pouvoir d'arrêt électronique.

N : concentration atomique de la cible.

Sur la figure 1.4, on représente les variations du pouvoir d'arrêt total en fonction de la vitesse de l'ion incident. La forme générale de ces courbes est valable pour n'importe quel ion dans n'importe quel matériau [26]. On distingue quatre régions différentes.

Zone I : dominée par l'arrêt nucléaire, cette contribution nucléaire est d'autant plus importante que l'ion est lourd.

Zone II : dominée par l'arrêt électronique.

Zone III : dite de Bethe-Block est la zone où le pouvoir d'arrêt décroît quand l'énergie augmente.

Zone IV : elle correspond aux énergies relativistes (vitesse ionique au delà de 10^7 eV/amu).

Dans cette zone, S_e redevient proportionnel à la vitesse incidente à cause de l'émission de photons par le matériau [26]. Sur la figure 1.16, cette zone est non représentée.

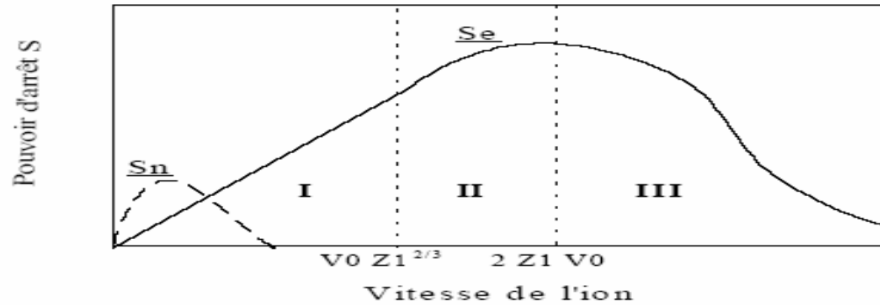


Figure 1.4: Schématisation des composantes nucléaire et électronique du pouvoir d'arrêt en fonction de la vitesse de l'ion incident [29]. Z_1 est le numéro atomique de l'ion

incident ; V_0 est la vitesse de Bohr (elle vaut $\frac{e^2}{h}$ (soit $2.2 \cdot 10^8$ cm/s))

4.1.1. Pouvoir d'arrêt nucléaire

Au cours de la collision nucléaire, l'ion incident transmet de façon élastique (conservation de la quantité de mouvement) son énergie cinétique au noyau de l'atome cible. Les collisions nucléaires permettent alors le ralentissement des particules incidentes en transférant leurs moments cinétiques aux atomes cibles. Elles permettent également la détermination de la distribution spatiale des impuretés dans la cible. Le processus de ralentissement nucléaire est prédominant pour des ions lourds et de faible vitesse. Si E est l'énergie cinétique de l'ion incident et N le nombre d'atome par unité de volume du matériau cible, le pouvoir d'arrêt nucléaire (section efficace de ralentissement nucléaire) est défini par la relation suivante [30]:

$$S_n(E) = \frac{1}{N} \left(\frac{dE}{dX} \right) = \int T d\sigma \quad (2)$$

Où

T : l'énergie transférée à l'atome cible par l'ion incident

$d\sigma$: la section efficace différentielle (*i.e.* la probabilité pour que le projectile cède de l'énergie à la particule cible lors du processus de collision).

La section efficace différentielle de collision $d\sigma$ a pour expression :

$$d\sigma = 2\pi p dp \quad (3)$$

Où

p : le paramètre d'impact, il représente la distance minimale entre les centres des noyaux.

Dans la théorie LSS, le potentiel utilisé est de type coulombien modéré par l'effet d'écran des électrons. Il est exprimé par :

$$V(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \phi\left(\frac{r}{a}\right) \quad (4)$$

Où

Z_1 et Z_2 sont les numéros atomiques du projectile et de la cible respectivement Ce potentiel, dit de Thomas-Fermi, est donc égal au potentiel de coulomb classique multiplié par une fonction d'écran ($\phi\left(\frac{r}{a}\right)$) qui tend vers 1 quand r diminue. Le terme a désigne le rayon d'écran, il est estimé par Bohr à partir du modèle atomique de Thomas-Fermi:

$$a = \frac{0.8853 a_0}{\sqrt{Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}}} \quad (5)$$

Dans la formule (5), le terme a_0 désigne le rayon de Bohr, il est exprimé par :

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{me^2} = 0.529 \text{ \AA} \quad (6)$$

En mécanique classique, le calcul final de $V(r)$ est utilisé pour déterminer la variation de la section efficace différentielle $d\sigma$ et de l'énergie T (*i.e.* l'énergie transférée à l'atome cible par l'ion incident) en fonction de l'angle de diffusion θ (*i.e.* l'angle entre la trajectoire de l'ion et l'axe X perpendiculaire à la surface du matériau implanté). L'énergie transférée $T(p)$ est exprimée par la relation suivante:

$$T(p) = \frac{4M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} E \sin^2\left(\frac{\theta(p)}{2}\right) \quad (7)$$

Le pouvoir d'arrêt nucléaire S_n d'une particule incidente est finalement calculé en intégrant $T(p)$ et $d\sigma$ sur le chemin parcouru [26].

4.1.2. Pouvoir d'arrêt électronique

Pendant la collision électronique, chaque ion incident peut interagir de façon inélastique avec les atomes de la cible pour produire des excitations électroniques et aboutir à l'ionisation des atomes au voisinage de la trajectoire des ions. Les interactions

inélastiques entre les ions incidents et les atomes cibles sont beaucoup plus complexes que les interactions élastiques.

Ceci est dû au fait que les interactions inélastiques ne peuvent pas être décrites par des chocs entre deux corps. En effet, au cours des collisions électroniques, chaque ion incident interagit avec plusieurs électrons qui sont eux-mêmes liés aux noyaux de la cible. Bien que les implantations ioniques appartiennent généralement à la zone II, le pouvoir d'arrêt électronique reste proportionnel à la vitesse de l'ion. Le pouvoir d'arrêt électronique est souvent décrit par le model LSS exprimé comme suit:

$$S_e = 8\pi e^2 a_0 \frac{Z_1^{7/6} Z_2}{\left(\frac{Z_1^2}{Z_1^3 + Z_2^3} + Z_2^2\right)^{3/2}} \frac{V}{V_0} D \quad (8)$$

Où

D : densité électronique de la cible ;

V_0 : la vitesse de Bohr;

a_0 : le rayon de Bohr

V : La vitesse de l'ion.

4.2. Cas d'un matériau cristallin

Les matériaux monocristallins possèdent une structure anisotrope où les effets directionnels peuvent jouer un rôle important lors de l'implantation ionique. En effet, l'arrangement en rangées et en plans cristallins a une influence non négligeable sur le pouvoir d'arrêt. Lorsque l'angle d'incidence des ions (par rapport à une rangée ou à un plan de la cible) est inférieur à une valeur critique Y_c , l'ion est repoussé

progressivement, par une série de déviations successives corrélées vers la rangée ou le plan adjacent. De cette façon, l'ion est focalisé entre deux plans ou dirigé suivant un axe cristallographique. Ceci est désigné par l'effet de canalisation qui peut être axial (par rapport à une direction) ou planaire (par rapport à un plan) (Figure 1.4).

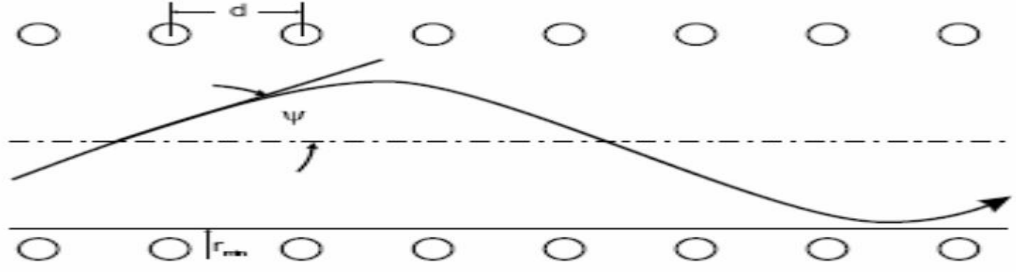


Figure 1.5: Schématisation de la trajectoire de l'ion incident dans un canal [31].

Lors d'une canalisation axiale ou planaire, le terme $(\frac{dE}{dX})_n$ traduisant la perte d'énergie nucléaire) est négligeable devant la perte d'énergie électronique. Les ions canalisés perdent leur énergie, presque uniquement, par interactions inélastiques sur les électrons. L'angle critique ψ_c de canalisation s'exprime comme suit :

Pour une canalisation axiale :

$$\Psi_c = \frac{\sqrt{2Z_1Z_2e^2}}{E_0d} = 9.73 \sqrt{\frac{Z_1Z_2}{E_0d}} \quad (9)$$

Et Pour une canalisation planaire :

$$\Psi_c = \frac{\sqrt{2Z_1Z_2e^2na}}{E_0} = 9.73 \sqrt{\frac{Z_1Z_2na}{E_0}} \quad (10)$$

Où d : distance inter-atomique en Å .

E_0 : énergie incidente de l'ion en keV .

n : densité atomique surfacique dans le plan .

a : rayon d'écran de Thomas-Fermi.

On constate que l'effet de la canalisation est probable dans le cas d'ions lourds et de faible énergie.

5. Distribution des ions en profondeur de la cible

L'étude du profil des ions implantés dans un matériau cible est un sujet croissant essentiellement pour deux raisons : la première est que l'implantation ionique a reçu récemment de nombreuses applications et demeure encore en voie d'expansion ; la seconde est qu'il existe maintenant des techniques très précises pour déterminer les profils expérimentaux comme par exemple la technique ERDA (Elastic Recoil Detection

CHAPITRE I: Généralités sur le dopage par implantation ionique

Analysis) et surtout la technique SIMS (Secondary Ion Mass spectrometry), ce qui permet d'effectuer des comparaisons avec les profils théoriques.

La distance totale parcourue par un ion le long de sa trajectoire est appelé parcours (noté R). Toutefois, ce qui intéresse l'utilisateur, c'est plutôt la distance parcourue dans la direction normale à la cible, que l'on appelle le parcours projeté. Le processus de ralentissement étant essentiellement statistique d'où les paramètres pertinents sont le parcours projeté moyen (noté R_p) et la dispersion des valeurs autour de R_p caractérisée par un écart type longitudinal ΔR_p et transversal ΔR_{\perp} [32].

La distance totale parcourue par un ion le long de sa trajectoire est déterminée à partir de l'énergie perdue, par collisions électroniques et nucléaires, comme suit:

$$R = \int_0^R dX = \frac{1}{N} \int_0^E \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)} \quad (11)$$

Expérimentalement nous n'avons pas accès à la distance (R) parcourue par l'ion incident. En pratique, le paramètre manipulé est la projection de ce parcours sur la direction perpendiculaire à la surface de la cible. Comme mentionné plus haut, ce paramètre, est désigné par le parcours moyen projeté (R_p). Il correspond à la moyenne de tous les parcours projetés et s'exprime comme suit:

$$R_p = \frac{1}{\Phi} \int x n(x) dx \quad (12)$$

Où

Φ : la dose totale implantée (ions/cm²) .

$n(x)$: la distribution en profondeur de tous les ions implantés. La fonction de distribution $n(x)$ est caractérisée par les quatre premiers moments physiques qui sont :

- * Le parcours moyen projeté R_p .
- * La déviation standard ΔR_p .
- * L'obliquité γ (ou skewness) qui mesure l'asymétrie de la distribution ou le positionnement du sommet de la courbe par rapport à R_p .

* Le kurtosis β qui mesure l'écrasement du pic (ou bien l'extension de la queue de distribution en volume). Les deux derniers paramètres sont reliés par l'expression universelle suivante:

$$\beta \approx 2.91 + 1.56\gamma^2 + 0.59\gamma^4 \quad (13)$$

CHAPITRE I: Généralités sur le dopage par implantation ionique

La fonction de distribution $n(x)$ est souvent de type gaussienne ou de Pearson [10, 11].

Dans le cas d'une distribution de Gauss, $n(x)$ est exprimé par la relation suivante:

$$n(x) = n_0 \exp\left(\frac{-(x-Rp)^2}{2(\Delta Rp)^2}\right) \quad (14)$$

Où

$$n_0 = \frac{\phi}{\sqrt{2\pi}\Delta Rp} \quad (15)$$

Avec γ et β approximativement égaux à 0 et à 3 respectivement.

6- conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques principes fondamentaux sur l'implantation ionique, ainsi que la distribution des ions dans la cible. avons présenté les différents aspects liés à l'interaction entre un ion et les atomes d'une cible, ainsi que les théories des ralentissement et de l'arrêt des ions dans un matériau. L'implantation ionique s'avère une technique très adaptée à l'environnement électronique et optique.

Références

- [1] S. Blanqué, "Optimisation de l'implantation ionique et du recuit thermique pour SiC", Thèse de doctorat, Univ. Montpellier II, (2004).
- [2] R. Legros, Physique des Semi-conducteurs Technologie-diodes, Tome 1, Editions Eyrolles,(1974).
- [3] A. Bensaada, Technologie des Semi-conducteurs, Office des Publications Universitaires,Alger, (1994).
- [4] <http://www.ion-beam-services.com>
- [5] M. Iwaki, Y. Okabe, S. Namba, K. Yoshida, Comparison between properties of steels implanted with separated ions and a selected ion, Nuclear Instruments and Methods 189 (1981) 155-159.
- [6] N.E.W. Hartley, G. Dearnaley, J.F. Turner, J. Saunders, Proc. Conf. on Applications of ion beams to metals, Albuquerque, 1973 (Plenum Press, New York, 1974) 123.
- [7] G. Dearnaley, N.E.W. Hartley, Proc. 4th Conf. on scientific and industrial applications of small accelerators, Denton, 1975 (IEEE, N.Y., 1976) 20
- [8] N. Hartley, Ion implantation and surface modification in tribology, Wear 34 (1975) 427-438
- [9] F.A. Smidt, Recent advances in the application of ion implantation to corrosion and wear protection, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section BBeam Interactions with Materials and Atoms 10-11(1985) 532-538
- [10] H. Bakhru, W. Gibson, C. Burr, A.J. Kumnick, G.E. Welsch, Modification of the fatigue behavior of copper and stainless steel by ion implantation, Nuclear Instruments and Methods 182/183 (1981) 959-964
- [11] T.D. Radjabov, Modification of physico-mechanical properties of metals and metallic coatings by ion implantation, Vacuum 42 (1991) 163-168
- [12] Y.P. Sharkeev, S.A. Gashenko, O.V. Pashchenko, V.P. Krivobokov, Evaluation of the microhardness of ion-implanted metals, Surface and Coatings Technology 91 (1997) 20-24.

- [13] A.N. Didenko, E.V. Kozlov, Y.P. Sharkeev, N.A. Popova, A.V. Paul, Y.F. Ivanov, L.N. Ignatenko, O.B. Perevalova, N.V. Girsova, A.I. Rjabchikov, R.A. Nasyrov, Microstructure of the near-surface layers of ion-implanted polycrystalline Cu, *Surface and Coatings Technology* 56 (1992) 11-17.
- [14] Y.P. Sharkeev, E.V. Kozlov, A.N. Didenko, S.N. Kolupaeva, N.A. Vihor, The mechanisms of the long-range effect in metals and alloys by ion implantation, *Surface and Coatings Technology* 83 (1996) 15-21.
- [15] M. Barlak, W. Olesinska, J. Piekoszewski, M. Chmielewski, J. Jagielski, D. Kalinski, Z. Werner, B. Sartowska, Ion implantation as a pre-treatment method of AlN substrate for direct bonding with copper, *Vacuum* 78 (2005) 205–209
- [16] Y. Hayashi, T. Ishikawa, D. Shimokawa, Modification of electrical and optical properties of metal nitride thin films by hydrogen inclusion, *Journal of Alloys and Compounds* 330–332 (2002) 348–351.
- [17] J.C. Pivin, Contribution of ionizations and atomic displacements to the hardening of ion-irradiated polymers, *Thin Solid Films* 263 (1995) 185-193.
- [18] G.R. Rao, P.J. Blau, E.H. Lee, Friction microprobe studies of ion implanted polymer surfaces, *Wear* 184 (1995) 213-222.
- [19] C. Allen, A. Bloyce, T. Bell, Sliding wear behaviour of ion implanted ultra high molecular weight polyethylene against a surface modified titanium alloy Ti-6Al-4V, *Tribology International* 29 (1996) 521-534.
- [20] A.J. Perry, R.R. Manory, R. Nowak, D. Rafaja, Post-treatment of titanium nitride by ion implantation, *Vacuum* 49 (1998) 89-95.
- [21] Y.P. Sharkeev, S.J. Bull, A.J. Perry, M.L. Klingenberg, S.V. Fortuna, M. Michler, R.R. Manory, I.A. Shulepov, On high dose nitrogen implantation of PVD titanium nitride, *Surface & Coatings Technology* 200 (2006) 5915–5920
- [22] T. Xu, S. Yang, M. Chen, J. Tian, Q. Xue, J. Li, W. Guo, Influence of nitrogen ion implantation on tribological properties of nanocrystalline diamond films, *Journal of Physics D: Applied Physics* 35 (2002) 788–793
- [23] <http://www.ion-beam-services.com>

[24] http://www.memoireonline.com/12/09/2961/m_Etude-des-nano-cavites-en-vuede-la-realisation-des-materiaux-alternatifs-agra3.html

[25]] M. Cavellier «Etude des effets de l'implantation ionique d'azote sur les propriétés du magnésium pur du cuivre pur et des alliages cuivreux », thèse de doctorat, université de Poitiers, France, 2012.

[26] L. Ottaviani, "Réalisation de Jonctions pn dans le Carbure de Silicium 6H par Implantation Ionique d'Aluminium", Thèse de doctorat, Lyon, (1999).

[27] Lindhard, Scharff, Schiott, Range Concepts and Heavy Ion Ranges, Mat. Fys. Medd., 33, (1963).

[28] M. Nastasi, J. W. Mauer, J. K. Huvonen. Ion-Sild Interaction : "Fundamentals and Application", University Press Combridge, (1995).

[29] G. Dearnaley, J. H. Freeman, R. S. Nelson and J. Stephen, Ion Implantation, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, (1973).

[30] N. Bohr, Kgl. Danske Videnskab. Mat-Fys. Medd., 18(8), (1948).

[31] J. Stark, Phys. Z, 13, (a), (1912), p.973.

[32] A. Baudrant, Implantation ionique et traitements thermiques en technologie de silicium, LAVOISIER, p.143 (2011).

[33] Lindhard, Scharff, Schiott, Range Concepts and Heavy Ion Ranges, Mat. Fys. Medd., 33, (1963).

[34] M. Nastasi, J. W. Mauer, J. K. Huvonen. Ion-Sild Interaction : "Fundamentals and Application", University Press Combridge, (1995).

CHAPITRE II :
METHODE DE DOPAGE PAR
L'IMPLANTATION IONIQUE

1- Introduction :

Le dopage des semi-conducteurs est un élément clé pour la fabrication des composants électroniques. En effet, un semi-conducteur pur est quasiment un isolant à la température ambiante. Le comportement électrique d'un composant semi-conducteur dépend d'une manière très forte de la répartition des dopants à l'intérieur de la structure, tous les éléments contrôlant le fonctionnement du dispositif (résistances d'accès, conductance, capacités,...) sont directement associés à la présence des dopants. Le contrôle des propriétés électriques d'un composant électronique à semi-conducteur nécessite une parfaite maîtrise des profils des dopants dans la structure, et donc un contrôle aussi précis que possible des étapes de diffusion et de l'implantation. De ce fait, dans ce dixième

chapitre, nous présenterons une compréhension globale sur la méthode théorie de dopage par implantation ionique, aussi, nous donnerons une description du mécanisme des défauts ponctuels du silicium. Enfin, nous allons discuter de l'implantation ionique et des différents types de dopage. Nous donnerons un aperçu général sur l'extraction des profils en profondeur pour les deux techniques de dopage des semi-conducteurs.

2- Propriétés du matière à l'état solide

La matière peut exister sous trois états physiques couramment distingués : l'état gazeux, l'état liquide et l'état solide, dont la forme sous la quelle se trouve est déterminée par les interactions entre ses particules constitutives : les atomes, les molécules ou les ions. Les liquides et les gaz sont des fluides, déformables sous l'action de forces très faibles, ils prennent la forme du récipient qui les contient.

Les solides ont une forme propre, leur déformation exige des forces importantes, donc les particules sont immobiles les unes par rapport aux autres. Les solides peuvent exister sous deux états différents : l'état désordonné caractérisé par une structure non ordonnée, c'est le cas des systèmes amorphes, tel que les verres; et l'état ordonné caractérisé par une structure ordonnée correspond aux solides cristallins. La figure 2.1 représente les structures ordonnée et non ordonnée de la matière à l'état solide.

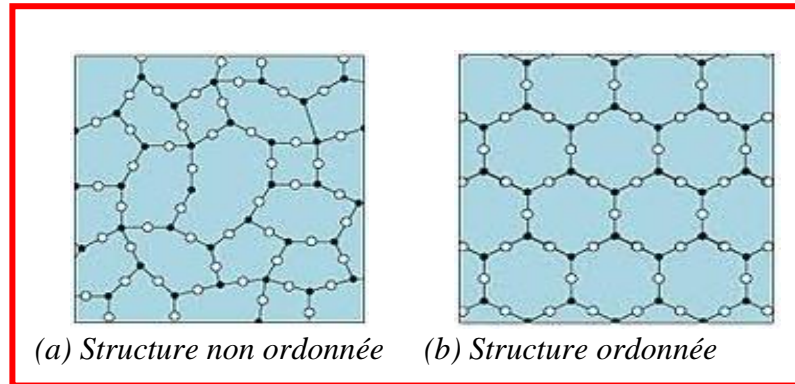


Figure 2.1 : Structures ordonnée et non ordonnée de la matière à l'état solide.

2.1- Solide amorphe

Les solides amorphes sont généralement appelés des verres et considérés comme des liquides de haute viscosité. Les atomes sont fixés les uns par rapport aux autres, mais ne sont pas rangés de façon ordonnée (figure 2.2). Par conséquent, la connaissance de la structure à un endroit donné ne permet pas de prévoir l'arrangement des atomes à un autre endroit. Il y a donc seulement un ordre local. L'absence d'ordre à longue distance implique que le solide est isotrope.

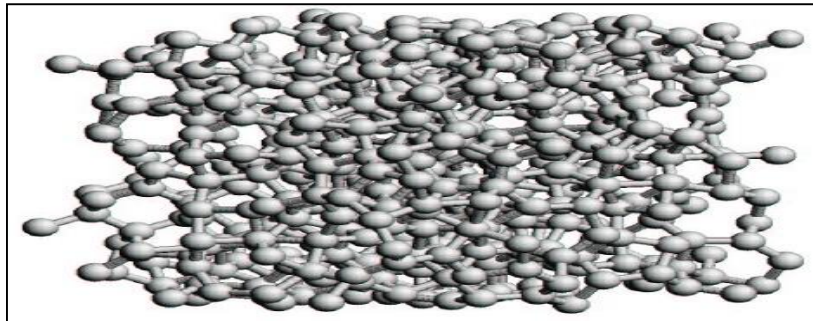


Figure 2.2 : Structure d'un solide amorphe.

2.2- Solide cristallin

Dans ce cas, les atomes sont rangés les uns par rapport aux autres de façon régulière sur de vastes portions de l'espace (figure 2.3), de quelques micromètres à quelques dizaines de centimètres (cristaux géants, en particulier de quartz). Dans un cristal, il y a un ordre (présentant néanmoins des défauts) à longue distance. Le solide est alors un corps anisotrope, avec des propriétés qui peuvent être différentes selon deux directions de l'espace.

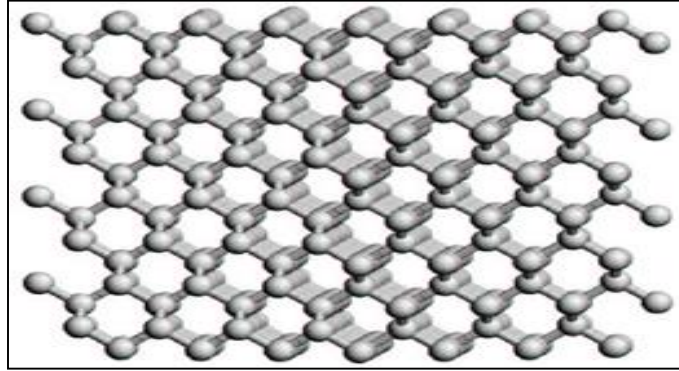


Figure 2.3 : Structure d'un solide cristallin.

2.3- Structure monocristalline

La réalisation de nombreux dispositifs commence par la production d'une matière monocristalline de grande pureté. En particulier la fabrication de puces microélectroniques nécessite des substrats monocristallins semi-conducteurs, par exemple du silicium, du germanium ou de l'arséniure de gallium.

2.4- Structure polycristallin

Dans ce cas, le lingot obtenu est composé de plusieurs gros cristaux, séparés par des joints de grain. Ce matériau, moins homogène que le silicium monocristallin, a de ce fait un rendement énergétique légèrement moins bon (13%) dans le commerce, mais sa fabrication est plus facile. La figure 2.4 représente la structure de silicium polycristallin.

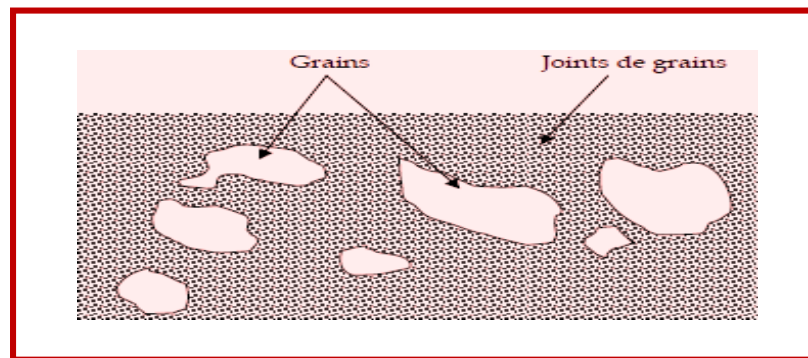


Figure 2.4 : Structure de silicium polycristallin.

3- Données physiques du silicium

Il existe trois semi-conducteurs élémentaires appartenant à la colonne IV du tableau périodique de Mendéléiev. Ce sont le silicium(Si), le germanium (Ge) et l'étain

gris (I-Sn) qui cristallisent dans la structure diamant. Par analogie, on inclut parfois le carbone(C) sous la forme polymorphique du diamant qui est un isolant. En outre, il apparait normal de classer dans le même groupe le composé isoélectronique carbure silicium (SiC) qui est un semi-conducteur. De nombreuses raisons ont fait que le silicium (Si) est devenu le matériau semi-conducteur prédominant. Par exemple, il permet la fabrication des dispositifs électriquement plus stables, il supporte mieux les températures supérieures à celle de ambiante, il est susceptible de former un oxyde , isolant et se caractérise par une grande stabilité chimique [1].

Comme beaucoup d'autres éléments, le silicium peut exister à température ambiante sous différentes structures, dont les deux extrêmes sont respectivement l'état amorphe et l'état cristallin. Il est habituel de considérer que le silicium polycristallin, nommé dans la suite « Sipoly », est composé d'une manière hétérogène de ces deux formes, c'est-à-dire de grains cristallins séparés par des zones amorphes [2].

4- Dopage en semi-conducteur

Le dopage des semi-conducteurs est un élément clef pour la fabrication des composants électroniques. En effet, un semi-conducteur pur (intrinsèque) est quasiment un isolant à la température ambiante, avec une bande de valence presque entièrement pleine, et une bande de conduction presque entièrement vide.

A titre d'exemple, la densité intrinsèque de porteurs libres dans le silicium est seulement de l'ordre de 10^{10} cm^{-3} à 300 K. Les propriétés électroniques intéressantes sont donc liées à la possibilité de "doper" le matériau par l'introduction d'impuretés adéquates (les dopants) permettant d'introduire des porteurs libres [3].

4.1- Dopage de type n

On introduit dans la matrice de silicium des atomes d'impuretés pentavalents tels que l'azote N phosphore P, l'arsenic As et l'antimoine Sb. L'azote, candidat naturel pour le dopage de type n s'insère facilement en sites substitutionnels grâce à son rayon covalent (0.079 nm). Le phosphore est aussi le donneur substitutionnel donnant les meilleurs résultats expérimentaux à l'heure actuelle pour le dopage de type n [4,6].

4.2- Dopage type p

On introduit dans le réseau une impureté trivalente : bore B, aluminium Al, gallium Ga, indium In. Il manque à l'impureté un électron de valence pour assurer les 4

liaisons avec les atomes de silicium voisins. Un faible apport d'énergie suffit pour qu'un électron d'un silicium voisin soit capté par l'impureté : il y a formation d'un trou peu lié et donc mobile. Les atomes trivalents deviennent des ions négatifs par capture d'un électron.

4.3- Exemple de dopage du Silicium

Un réseau monocristallin d'atomes de silicium, Si, est un semi-conducteur. L'atome de silicium ayant quatre électrons de valence, il établit quatre liaisons covalentes avec quatre atomes voisins. Un semi-conducteur au silicium a une conductivité quasi nulle. Afin d'augmenter sa conductivité, on insère dans la structure cristalline des atomes d'autres éléments, appelés dopants. Pour un semi-conducteur au silicium dopé au phosphore, un atome de phosphore, P, remplace un atome de silicium dans le réseau. L'atome P ayant cinq électrons de valence, il forme quatre liaisons covalentes avec des atomes de silicium voisins. il reste un électron libre qui peut participer à la conduction électrique. L'atome de phosphore étant donneur d'électron, on parle de dopage de type n (n pour négatif). Par un raisonnement analogue, un atome dopant possédant trois électrons de valence, comme le bore, B, conduit à un déficit d'électron de valence dans le réseau, appelé trou. Ce trou peut être comblé par un électron de valence d'un atome de silicium voisin, déplaçant ainsi le trou. L'atome de bore étant accepteur. (Figure 2.5) [5]

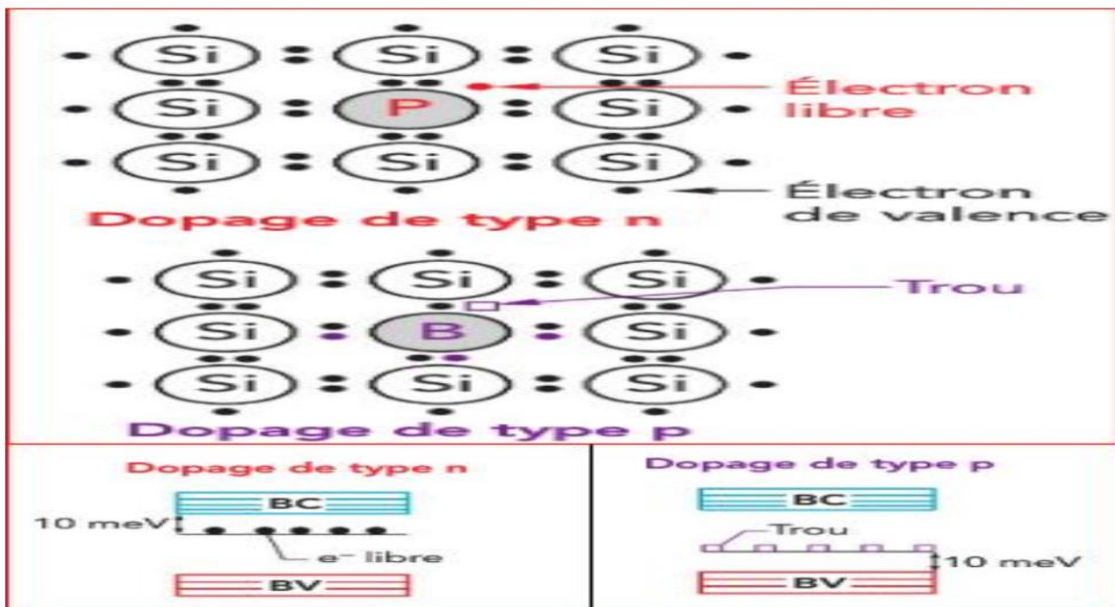


Figure 2.5: *dopage de type N et dopage de type P dans un semi-conducteur.* [5]

5-Principe de l'interaction ion-matière

5.1- Principe

On dit qu'il y a collision quand deux ou plusieurs objets se rapprochent et subissent une interaction mutuelle sans forcément qu'un impact ait eu lieu. Dans le cas d'une collision élastique l'énergie totale et la quantité de mouvement totale se conservent. [7,8]

5.2- Transfert d'énergie

En terme d'énergie, le dire que il y a une collision ion-atome, conduit à dire qu'il y a un transfert énergétique vers l'atome-cible. Donc on aura une redistribution de l'énergie au niveau du système ion-atome. La figure 2.6 représente le diagramme d'énergie cinétique totale du système ion-atome avant et après collision lorsque l'atome est initialement dans un niveau d'énergie E_a .

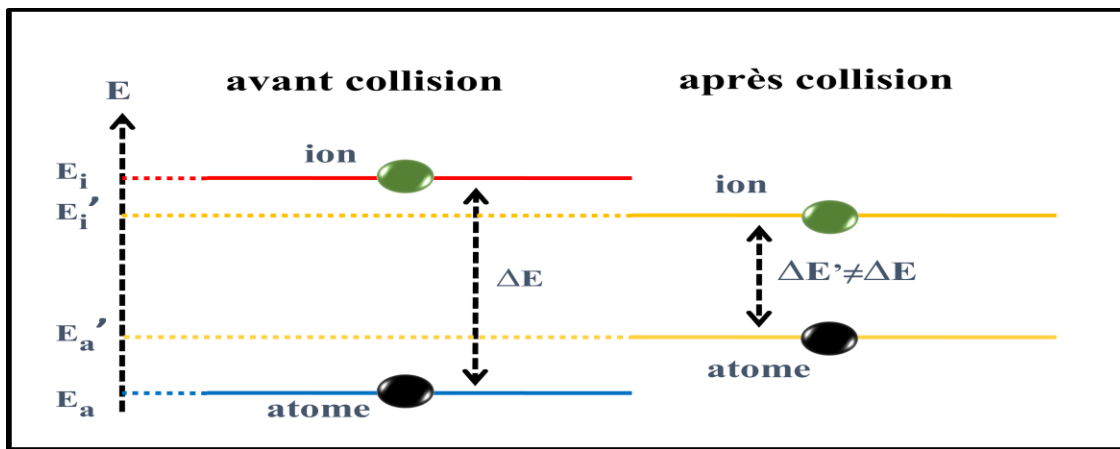


Figure 2.6 : Diagramme de l'énergie cinétique totale du système ion-atome avant et après collision.

6- Distribution des ions implantés en profondeur

L'étude de la profondeur de distribution des ions est souvent basée sur l'hypothèse d'un solide amorphe. Selon la théorie L.S.S (Lindhard, Scharff et Schiott), l'arrêt des ions présente une distribution gaussienne [9 ,10,11].

La distance parcourue par un ion le long de sa trajectoire est déterminée à partir de l'énergie perdue, par collisions nucléaire et électronique, comme suit :

$$R = \int_0^R dr = \frac{1}{N} \int_0^E \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)} \quad (3)$$

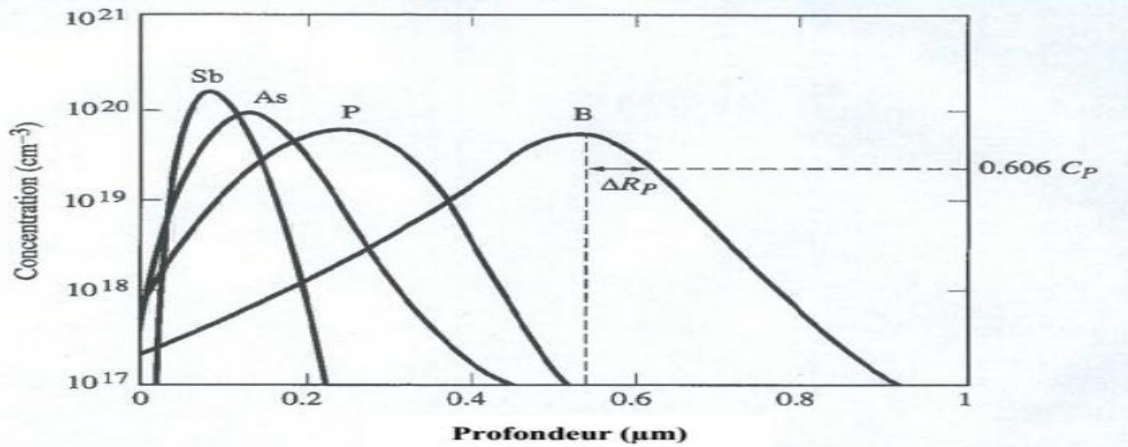


Figure 2.7 Distribution d'ions dans le silicium implantés à [12].

Expérimentalement nous n'avons pas accès à la distance (R) parcourue par l'ion incident. En pratique, le paramètre utilisé est la projection de ce parcours sur la direction perpendiculaire à la surface de la cible. Comme mentionné plus haut, ce paramètre est désigné par le parcours moyen projeté. Il correspond à la moyenne de tous les parcours projetés et s'exprime comme suit :

$$R_p = \frac{1}{\phi} \int x n(x) \cdot dx \quad (4)$$

Avec :

ϕ : la dose totale implantée (ions/cm²).

$n(x)$: la distribution en profondeur de tous les ions implantés.

7- Modèle de distributions théoriques

7.1- Modèle de distributions Gaussienne

Considéré comme le plus classique des modèles analytiques, ce modèle est exprimé par la relation suivante :

$$C(x) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\delta R_p} \exp\left(-\frac{(x-R_p)^2}{2\delta R_p^2}\right) \quad (5)$$

Où N est le nombre total d'ions implantés par unité de surface, R_p est la profondeur moyenne de pénétration (projected range) et δR_p est un facteur qui caractérise la déviation standard du profil (projected straggle). Pour le calcul et la détermination de ces deux paramètres, qui ne sont en fait que les deux premiers moments de la distribution gaussienne, il suffit simplement de se référer aux formules qui ont été rapportées dans la littérature et qui sont données par plusieurs auteurs [13].

7.2- Modèle de distributions demi-Gaussienne

Nous venons de voir que la première description des profils de dopage est basée sur la distribution de probabilité Gaussienne centrée autour de la portée projetée avec une deviation standard projetée (l'écart type) . Généralement, le profil Gaussien de l'équation précédente est insuffisant pour décrire parfaitement les profils réels. Si le profil est légèrement asymétrique, alors un troisième moment devient indispensable pour obtenir une bonne description des profils. Dans ce cas le profil est donné par le joint des deux profils demi-gaussiens avec la portée et les déviations δR_{p1} et δR_{p2} .

$$x \leq R_m \quad C(x) = \frac{2N}{\sqrt{2\pi(\delta R_{p1} + \delta R_{p2})}} \exp\left(-\frac{(x-R_m)^2}{2\delta R_{p1}^2}\right) \quad (6)$$

$$x \geq R_m \quad C(x) = \frac{2N}{\sqrt{2\pi(\delta R_{p1} + \delta R_{p2})}} \exp\left(-\frac{(x-R_m)^2}{2\delta R_{p2}^2}\right) \quad (7)$$

R_m , δR_{p1} , δR_{p2} peuvent être calculés ou donnés par des tables :

$$R_p = R_m + 0.8(\delta R_{p2} - \delta R_{p1}) \quad (8)$$

$$\delta R_p^2 = 0.64(\delta R_{p2} - \delta R_{p1})^2 + (\delta R_{p1}^2 - \delta R_{p2} + \delta R_{p2}^2) \quad (9)$$

$$\gamma = \delta R_p^{-3}(\delta R_{p2} - \delta R_{p1}).(0.218 \delta R_{p1}^2 + 0.36 \delta R_{p1} \delta R_{p2} + 0.128 \delta R_{p2}^2) \quad (10)$$

$$\beta \approx 2.19 + 1.56\gamma^2 + 0.59\gamma^4 \quad (11)$$

Ces dernières équations se résolvent itérativement et les valeurs approchées de δR_{p1} et δR_{p2} sont obtenues par une interpolation. Pour la plupart des implantations dans le Silicium et dans beaucoup d'autres semi-conducteurs [14,15].

7.3- Modèle de distributions Pearson IV

La correction par la distribution de type Pearson a pour objectif d'améliorer la description du profil de dopage des particules en rendant son allure plus proche avec celui obtenu expérimentalement, cette distribution est définie par les quatre paramètres suivants : la position moyenne (R_p), l'écart type σ_p , l'asymétrie (γ) et l'aplatissement (β) [16]. Afin de calibrer ces paramètres de manière à ce que les distributions Pearson IV aient une allure similaire à celle des profils expérimentaux, commençons par caractériser ces fonctions en fonction de chacun de ces quatre paramètres. D'une manière générale, une distribution se caractérise en fonction de ses moments. Le moment d'ordre 1, est défini par :

$$\mu_1 = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx \quad (12)$$

Où

μ_1 correspond à la position moyenne de la distribution , on le note en général R_p .

Les moments d'ordre supérieurs ($i=2, 3, \dots$), s'expriment en fonction de R_p de la manière suivante :

$$\mu_i = \int_{-\infty}^{\infty} (x - R_p)^i f(x) dx \quad (13)$$

Les distributions de type Pearson sont solutions de l'équation différentielle [17] :

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{(x-a)f(x)}{b_0 + b_1x + b_2x^2} \quad (14)$$

$$a = b_1 = -\frac{\gamma\sigma_p(B+3)}{A} \quad (15)$$

$$b_0 = -\frac{\sigma_p^2(4B+3\gamma^2)}{A} \quad (16)$$

$$b_2 = -\frac{2\beta+3\gamma^2-6}{A} \quad (17)$$

Où

$A = 10\beta - 12\gamma^2 - 18$ et σ_p représente l'écart type de la distribution.

Le coefficient mesure l'asymétrie ($VNHZQHVV$) de la distribution ; Si < 0 , nous avons une queue vers la surface, par contre si $\gamma > 0$ la queue sera après et donc le profil aura une descente moins abrupte [18].

La distribution de Pearson s'exprime en fonction de ses quatre moments :

$$R_p = \mu_1 , \quad \sigma_p = \sqrt{\mu_2} , \quad \gamma = \frac{\mu_3}{\sigma_p^3} , \quad \beta = \frac{\mu_4}{\sigma_p^4} \quad (18)$$

Selon la valeur de ces coefficients, nous pouvons distinguer sept types de distributions Pearson, mais dans notre cas on utilise la distribution Pearson IV, car elle définit pour tout x tel que $-\infty < x < +\infty$, alors que les autres types sont définis sur des domaines restreints [22]. De plus, elle présente un unique maximum à la profondeur $x = R_p + a$, avec a le coefficient défini par l'équation (15) et décroît de manière monotone vers 0 de chaque côté de ce maximum, dans ces conditions des distributions Pearson IV, les coefficients asymétrie et aplatissement doivent satisfaire les conditions énoncées ci-dessous [16] :

$$0 < \gamma^2 < 32 \quad \text{et} \quad \beta > \frac{39\gamma^2 + 48 + 6(\gamma^2 + 4)^{3/2}}{32 - \gamma^2} \quad (19)$$

L'expression de la distribution Pearson IV se présente alors sous la forme :

$$f(x) = K [b_0 + b_1(x - R_p) + b_2(x - R_p)^2] \exp\left[-\frac{\frac{b_1}{b_2} + 2a}{\sqrt{4b_0b_1 - b_2^2}} a \tan\left(\frac{2b_2(x - R_p) + b_1}{\sqrt{4b_0b_2 - b_1^2}}\right)\right] \quad (20)$$

Avec, K une constante de normalisation dont la valeur est fixée de manière à ce que la relation suivante soit vérifiée :

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx=1 \quad (21)$$

8- La simulation des paramètres par le code SRIM (Le programme SRIM [The Stopping and Range of Ion in Matter])

8.1- Introduction

SRIM [19,20,21], Stopping and Range of Ions in Matter, est une collection de logiciels informatiques qui simulent l'interaction des ions incidents avec la matière. Toutes les collisions ion/atome sont traitées par la mécanique quantique. L'arrêt et la distribution des ions dans le solide peuvent être calculés, en principe, dans la gamme d'énergie 10 eV – 2 GeV/uma. Les programmes ont été développés par James F. Ziegler et Jochen P. Biersack dans les années 80. Depuis son introduction en 1985, des améliorations et des corrections importantes sont faites tous les six ans sur la base de nouvelles données expérimentales. Actuellement, plus de 700 citations scientifiques sont faites en relation avec SRIM chaque année. Le programme permet un calcul rapide de l'implantation et de la pulvérisation. Les informations accessibles sont le profil d'implantation de l'ion incident, le rendement de pulvérisation des différentes espèces chimiques et l'échange d'énergie par choc nucléaire et par diffusion inélastique.

La figure 2.8 montre un exemple de simulation des interactions de la particule dans la cible (Al) par TRIM particule par particule.

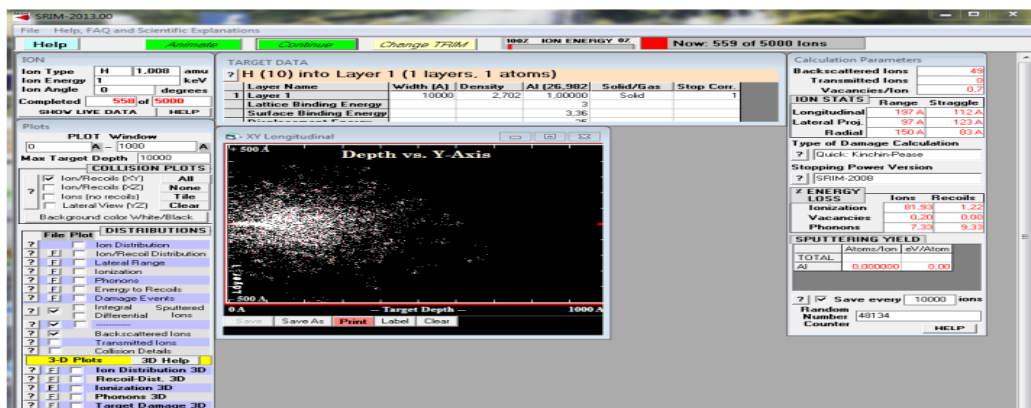


Figure 2.8 simulation de straggling par le logiciel TRIM

8.2- Principe de fonctionnement

Les simulations sont réalisées par la méthode de Monte Carlo dans les limites des cascades binaires dans une cible amorphe [29]. Les utilisateurs peuvent définir les paramètres initiaux de la cible (matériau, composition, densité) et des ions primaires (nature, énergie et angle d'incidence). Le choix du nombre de particules incidentes permet de définir la qualité statistique de la simulation. Comme pour toute simulation, l'augmentation de cette dernière a pour conséquence l'augmentation du temps de calcul. Les collisions sont toutes traitées comme des systèmes à deux corps (approximation dite BCA : Binary Collision Approximation); c'est-à-dire que les différents chocs ne sont pas corrélés entre eux. Après un choc, les atomes peuvent subir d'autres collisions. Ce modèle suppose implicitement qu'aucune énergie n'est donnée aux électrons, et plus généralement il ignore toutes les diffusions inélastiques.

Le calcul SRIM repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices. Tout d'abord, le matériau est considéré comme amorphe, même si la distance moyenne entre les atomes correspond à la distance interatomique du matériau cristallin. SRIM est donc incapable de prendre en compte un quelconque effet de canalisation, ce qui réduit de deux ordres de grandeur la probabilité d'avoir des chocs atomiques. De plus, les atomes sont considérés comme immobiles (le matériau est à 0 K) ce qui met de côté les phénomènes de recombinaison entre, par exemple, un atome déplacé et une lacune. Le taux calculé doit donc être vu comme une borne supérieure de l'endommagement possible causé par le faisceau d'analyse.

8.3- Entrées et sorties de SRIM

La figure 2.9 montre l'interface du logiciel SRIM version 2008 avec les différentes options possibles et les différents paramètres à introduire pour le calcul.

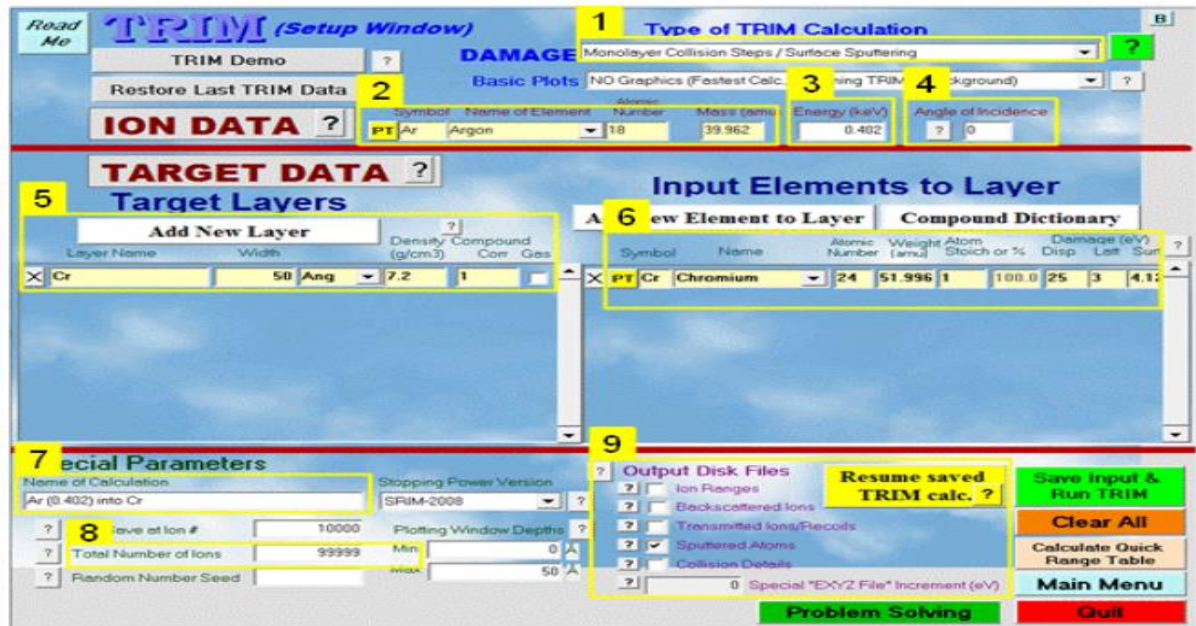


Figure 2.9: Interface du logiciel SRIM-2008.

L'interface du logiciel TRIM possède plusieurs options. Les options de 1 à 9 permettent de choisir les paramètres d'entrée et de sortie regroupés dans le tableau 2.1 (version TRIM (SRIM-2008) pour chaque option).

Option	Paramètres	
1	Entrées	Elle permet de choisir les phénomènes à étudier parmi : - l'endommagement de la cible et la distribution des ions. - l'implantation ionique. - la pulvérisation - l'énergie spécifique/angle/profondeur des ions,
2	Les données d'ions incidents: nom, symbole, nombre atomique, masse atomique	
3	Energie des ions en keV	
4	L'angle d'incidence des ions entre 0 et 90°	
5	La nature du matériau soumis au bombardement ionique	
6	Le nom, le nombre atomique, la stœchiométrie du matériau bombardé et l'énergie de liaison des atomes	
7	Nom de la simulation : gaz (énergie en keV) - cible.	
8	Le nombre d'ions injectés (le nombre maximum peut atteindre 10^7 et la valeur par défaut est fixée à 716 381 ions)	
9	Sorties	<i>Range.txt</i> : tableau de la répartition finale des ions et des atomes cibles de recul. <i>Backscat.txt</i> : cinétique de tous les ions rétrodiffusés (énergie, emplacement et trajectoire). <i>Transmit.txt</i> : cinétique de tous les ions transmis (énergie, localisation et trajectoire). <i>Sputter.txt</i> : cinétique de tous les atomes de la cible par pulvérisation cathodique de la cible. <i>Collision.txt</i> : tableau de toutes les collisions atomiques ions/cibles qui conduisent à endommager la cible.

Tableau 2.1: Paramètres d'entrée et de sortie de TRIM.

9- conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques principes fondamentaux concernant la matière solide, et les données physiques de silicium. Nous avons explicité les

principales fonctions de distribution donnée par les théories classiques, décrivant la répartition des particules implantées à l'intérieur du matériau cible. Il s'avère que la distribution la plus simple est de type Gaussien présentant une asymétrie nulle et définie par la position moyenne R_p , et l'écart σ_p .

La fonction de distribution de type Pearson IV, calibrée par quatre paramètres appelés les quatre moments de distribution $(R_p, \sigma_p, \gamma, \beta)$, et utilisées de plus en plus en microélectronique pour la description des profils d'implantation ionique de dopants, présente une allure similaire à celle du profil expérimental.

A travers l'ensemble des théories présenté dans ce chapitre, apparaît l'efficacité par le code SRIM pour la description des différents effets engendrés par le phénomène d'implantation ionique.

Références

- [1] Francis. LEVY, "*Physique et technologie des semi-conducteurs*" Traité des Matériaux(1995).
- [2] N. W. ASHCROFT et N. D. MERMIN." *Solid state physics, Saunders College Publishing*", 1976.
- [3] M. Cavellier «Etude des effets de l'implantation ionique d'azote sur les propriétés du magnésium pur du cuivre pur et des alliages cuivreux », thèse de doctorat, université de Poitiers, France, 2012.
- [4] Éléments de physique des semi-conducteur.doc
file:///C:/Users/MOB/Downloads/elements-de-physique-des-semi-conducteurs.pdf
(2003).
- [5] Conducteurs – semi-conducteurs - supraconducteur, thème les matériaux,
<http://spcts.e-monsite.com/medias/files/14-t3-conducteurs-semi-conducteurs.pdf>
- [6] T. Kociniewski, Homoépitaxie et dopage de type n du diamant.
thèse de doctorat, Université de Versailles (2006)
- [7] A. Zouke, étude des phénomènes d'interaction faisceau d'électron gaz –matière dans un MEB, Thèse Doctorat , Université Lille I (2013)
- [8] R. Nouri , Etude par spectroscopie de rétrodiffusion Rutherford de l'implantation ionique. thèse de magistère , Université Mentouri de Constantine Algérie (2010).
- [9] Lindhard, Scharff, Schiott, Range Concepts and Heavy Ion Ranges, Mat. Fys. Medd., 33, (1963).
- [10] Lindhard J., Scharff M., "Energy dissipation by Ion in the KeV Region" Physical Review, (1961), Vol.24, n°1, pp.128-130.
- [11] A. Bensaada," Technologie des Semi-conducteurs", Office des Publications Universitaires, Alger, (1994).
- [12] http://extraerg.enserg.fr/fr/form/m8/cours_td Annales/montes/mems/Cours/Diffusion_implantation_LM.pdf
- [13] W. L. Engl , "Process and Device Modeling" , North-Holland Editions, (1986), Chap.2.
- [14] H. Ryssel, K. Muller, K. Habberger, R. Hankelmanne, F. Jahel, J. Appl. Phys., Vol.22, (1980), p.35.

- [15] J. H. Ryssel, K. Habberger, K. Hoffmann, G. Prinke, R. Dumcke, A. Sacks, IEEE, Trans. Electron. Devices, Vol. ED 27, (1980), p.1485.
- [16] M. A. JAUD, "Approche du potentiel effectif pour la simulation MonteCarlo du transport électronique avec effets de quantification dans les dispositifs MOSFETs „". Thèse de Doctorat, Paris Sud XI, Orsay, France, (2006).
- [17] S. Selberherr, "Analysis and simulation of semiconductor devices", Springer-Verlag, (1984).
- [18] M. B. Lazar, " Etude du dopage par implantation ionique d'aluminium dans le carbure de silicium pour la réalisation de composants de puissance ", Thèse de Doctorat, INSACEGELY, n° 02 ISAL 0016, Lyon. France, (2002).
- [19] J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack, SRIM – The stopping and range of ions in matter, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 268 (2010) 1818-1823.
- [20] J.F. Ziegler, The Stopping of Energetic Light Ions in Elemental Matter, J. Appl. Phys. 85 (1999) 1249-1272.
- [21] J.F. Ziegler, SRIM-2003, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 219- 220(1-4) (2004) 1027-1036.

CHAPITRE III:

**SIMULATION DES
PARAMETRES LIES A
L'IMPLANTATION IONIQUE
DU BORE ET DU
PHOSPHORE DANS LE
SILICIUM DOPE AU
NITROGENE**

1-Introduction

Ce chapitre est consacré à l'ensemble des résultats obtenus par simulation en utilisant le code TRIM (Transport of Ions in Matter) de l'implantation du bore et phosphore dans une couche amorphe de silicium dopé azote. Grâce à ce code, il nous serait possible de prévoir plusieurs informations sur le comportement du bore et phosphore dans le silicium en présence de l'azote. Nous présentons en particulier, à travers ce chapitre, l'influence de l'énergie d'implantation et de la composition chimique du film implanté sur le profil d'implantation du bore et phosphore obtenus.

2-Présentation de la structure à implanter

Nous étudions les profils d'implantation du bore dans des films minces de silicium dopé azote déposé sur un substrat monocristallin préalablement oxydé (figure 3.1).

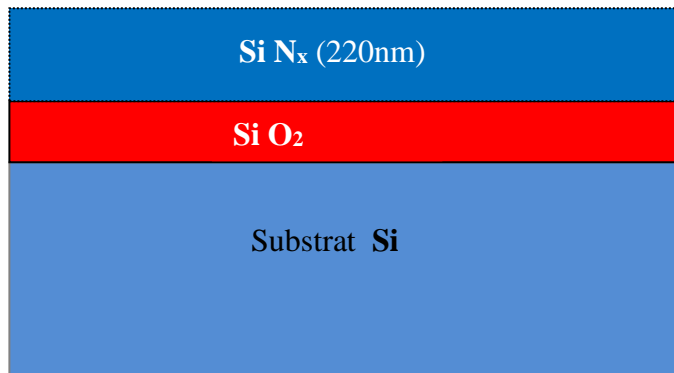


Figure 3.1 : Représentation de la structure à implanter : $SiN_x/SiO_2/Si$.

3-Paramètres de la simulation

Le programme TRIM nous permet de créer la structure $SiN_x/SiO_2/Si$, et de choisir le dopant et l'énergie utilisés dans l'implantation. Les éléments présents dans la simulation sont alors le bore B, le phosphore P et les constituants de la cible à savoir: le silicium (Si), l'azote (N), et l'oxygène (O).

Pour simuler l'effet de la composition chimique de la cible, Nous utilisons des taux d'azote de 2%, 6%, et de 10%. Pour décrire l'effet du désordre du réseau cristallin du silicium causé par la présence d'azote [1] dans la première couche, nous désorientons le faisceau d'ions à chaque fois avec un certain angle. De cette façon le code TRIM prend en considération l'accroissement du désordre de la cible avec l'augmentation du taux d'azote.

Dans le cas de notre travail, nous avons utilisé le type de calcul "Ion Distribution and Quick Calculation of Damage" [2]. Notons que le code TRIM ne tient compte que des cibles amorphes [3].

4-Simulation et interprétation

4.1- Simulation du pouvoir d'arrêt

Les simulations des pouvoirs d'arrêt électronique et nucléaire, des taux de pulvérisation et de la quantité de défauts créés en fonction de la profondeur du matériau cible sont réalisées avec le logiciel TRIM (Transport and Range of Ions in Mater [4,5]. Ce logiciel utilise le code TRIM basé sur une méthode de calcul type Monte-Carlo [6]. Le logiciel TRIM calcule les trajectoires des ions dans un solide. Ce logiciel permet d'obtenir rapidement une idée de la profondeur à laquelle les ions sont implantés. Les défauts créés sont simulés en fonction de la nature, de l'énergie et de l'angle d'incidence d'un faisceau d'ion et de la nature de la cible. Cependant plusieurs approximations sont faites lors de ces calculs. En effet ils sont effectués en se basant sur l'approximation qu'il existe uniquement des collisions binaires, l'ion incident ne voit que l'atome de la cible qu'il va collisionner, les voisins sont négligés. De plus SRIM ne génère que des défauts ponctuels, chaque atome collisionné avec une énergie supérieure à son énergie de déplacement devient un atome interstitiel et laisse une lacune derrière lui. Pour mettre en œuvre le code de simulation, l'utilisateur doit introduire différents paramètres. Evidemment, le choix de ces paramètres est crucial et le chercheur doit se mettre dans les conditions qui se rapprochent le plus du cas réel. En ce qui nous concerne, dans un premier temps, nous nous sommes mis dans un cas général destiné à l'étude des interactions ions matière. Au cours de la seconde étape, nous avons considéré le cas particulier où les conditions suivantes ont été impliquées : nous avons choisi une cible de silicium (épaisseur = 10000 Å) sur laquelle nous avons supposé une fine couche d'oxyde SiO₂ (épaisseur = 15 Å). Cet oxyde a été introduit pour représenter l'oxyde de silicium natif sur la surface de Si. La croissance de l'oxyde et sa qualité dépendent de la qualité du substrat de silicium et en particulier de sa surface, à partir de laquelle il doit croître. Une surface rugueuse donnera un oxyde de mauvaise qualité. C'est pour cela que des procédés de nettoyage sont mis en œuvre avant l'oxydation afin d'assurer une surface propre et lisse [8]. Le type des ions

sélectionnés suivant que l'on désire avoir un dopage de type N ou un dopage de type P. Le nombre des ions utilisé est 10000. Alors que la valeur proposée, par défaut, par le logiciel est 99999. On doit noter que nous avons essayé des nombres plus élevés, et nous avons remarqué que ceci augmentait le temps de calcul sans améliorer la précision des résultats. S'agissant de l'orientation de la cible par rapport au faisceau d'ions, nous avons utilisé les deux cas les plus répandus en implantation ionique, c'est-à-dire 0° . Enfin, on signale que le logiciel SRIM ne tient compte que des cibles amorphes.

4.1.1- Pouvoirs d'arrêt du Bore et du phosphore dans la structure $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$

Dans l'implantation ionique, il est essentiel d'étudier les pouvoirs d'arrêt de n'importe quelle particule utilisée et dans n'importe quelle structure. Comme nous avons déjà vu dans le chapitre précédent, ces pouvoirs représentent les pertes d'énergie à cause des différentes interactions qui se produisent lors de l'irradiation par faisceau. Les interactions peuvent être nucléaires et elles se produisent avec les noyaux du matériau ou bien électroniques par la contribution des électrons de l'atome cible. Dans notre cas on limitera l'étude sur une petite gamme d'énergie où elle est la plus faible relativement au domaine vaste des énergies utilisées en implantation ionique. La gamme est comprise entre 5 et 25 keV, tant que les pertes en énergie sont calculées par rapport à l'unité de la longueur (\AA).

Les figures 3.2 à 3.7 représentent les résultats de simulation par le code TRIM concernant les pouvoirs d'arrêt du bore et du phosphore dans le silicium dopé azote en fonction de l'énergie d'implantation pour différentes quantités d'azote dans le silicium.

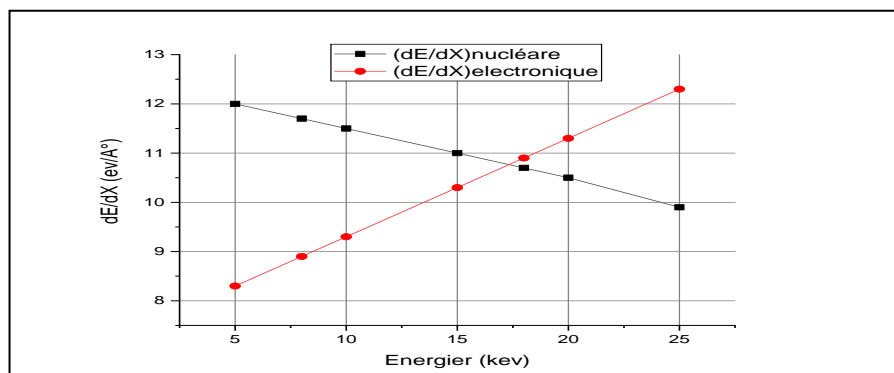


Figure 3.2 : Simulation des pouvoirs d'arrêt nucléaire et électronique du bore dans la cible $\text{SiN}_{0.02}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, en fonction de l'énergie incidente des ions

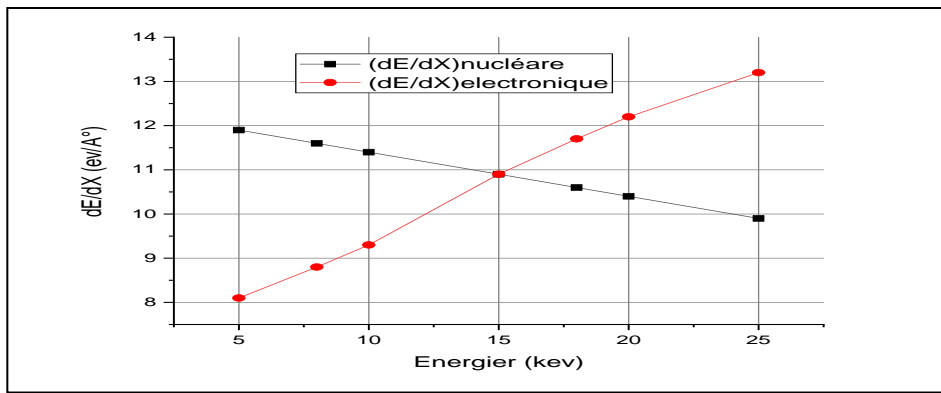


Figure 3.3 : Simulation des pouvoirs d'arrêt nucléaire et électronique du bore dans la cible $\text{SiN}_{0.06}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, en fonction de l'énergie incidente des ions.

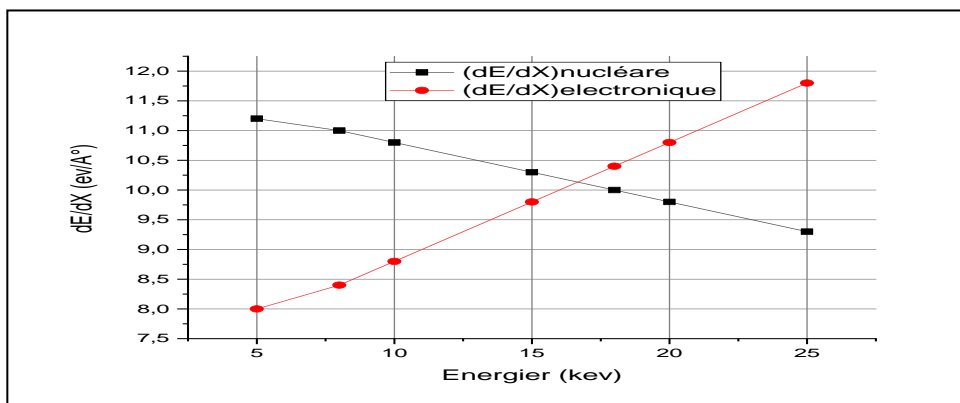


Figure 3.4 : Simulation des pouvoirs d'arrêt nucléaire et électronique du bore dans la cible $\text{SiN}_{0.1}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, en fonction de l'énergie incidente des ions.

Pour le bore, nous observons clairement, que les deux types de pouvoirs d'arrêt dépendent de l'énergie d'implantation. En effet, le pouvoir d'arrêt nucléaire diminue avec l'augmentation de l'énergie, alors que le pouvoir d'arrêt électronique augmente avec l'accroissement de l'énergie d'implantation. Dans les deux cas, la relation qui exprime l'évolution des pertes est à la fois proportionnelle à la nature et au nombre des collisions qui se produisent durant l'implantation du bore. Du fait que les ions du bore sont légers (faible masse atomique), le processus qui génère les pertes nucléaires est par conséquent faible. De plus, en augmentant l'énergie d'implantation, les pertes nucléaires diminuent. Cependant un nombre considérable des collisions électroniques modifie d'une manière notable l'énergie interne des atomes de la cible. Cette modification résulte de l'excitation d'un grand nombre des électrons conduisant à un accroissement des pertes électroniques.

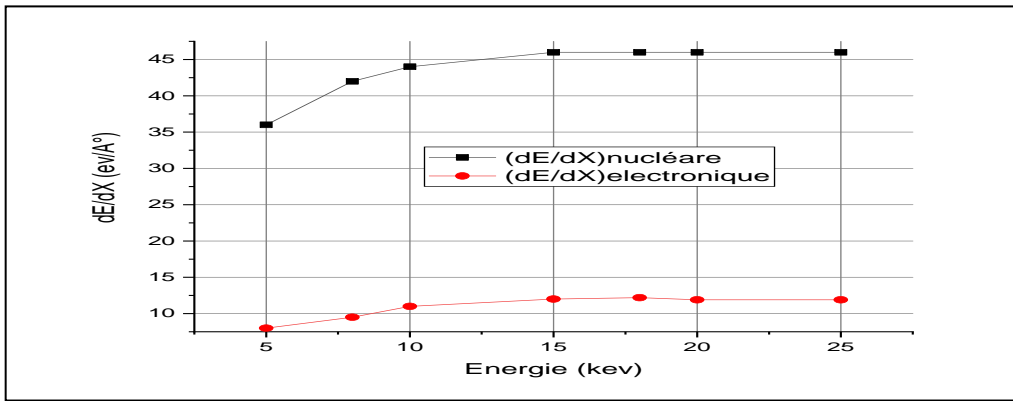


Figure 3.5 : Simulation des pouvoirs d'arrêt nucléaire et électronique du phosphore dans la cible SiN_{0.02}/SiO₂/Si, en fonction de l'énergie incidente des ions.

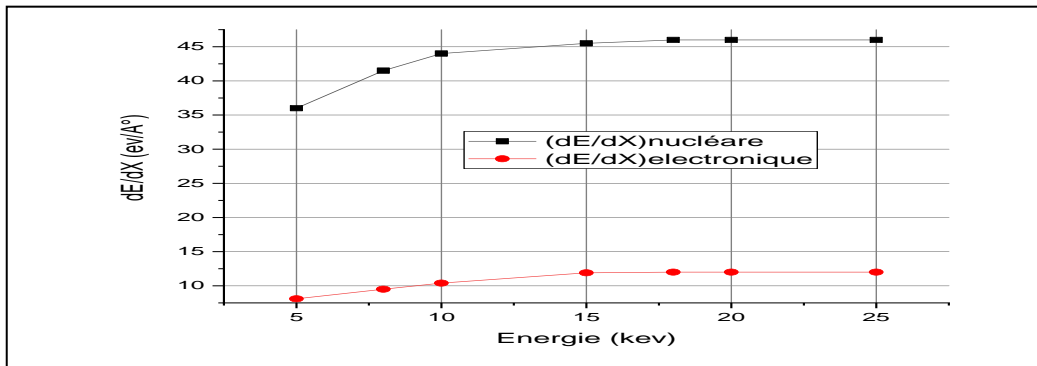


Figure 3.6 : Simulation des pouvoirs d'arrêt nucléaire et électronique du phosphore dans la cible SiN_{0.06}/SiO₂/Si, en fonction de l'énergie incidente des ions.

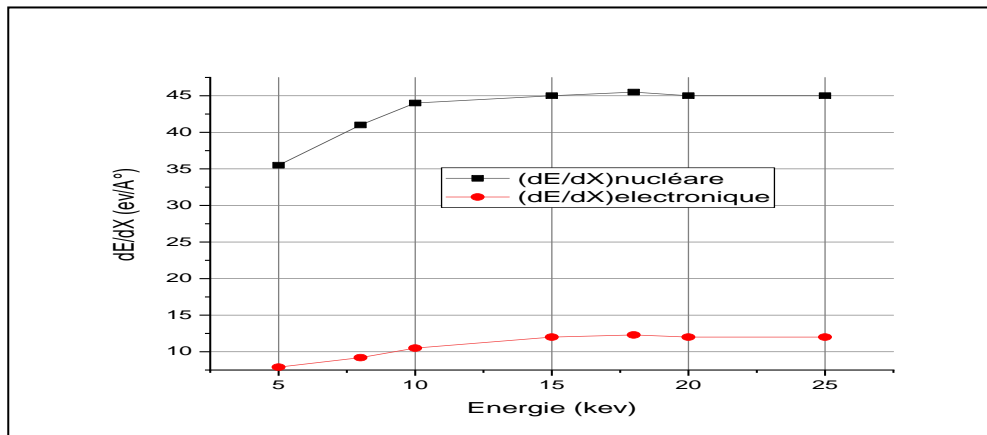


Figure 3.7 : Simulation des pouvoirs d'arrêt nucléaire et électronique du phosphore dans la cible SiN_{0.1}/SiO₂/Si, en fonction de l'énergie incidente des ions.

Pour le phosphore, A partir de les figure 3.5 à 3.7 nous observons que les deux types de pouvoirs d'arrêt dépendent de l'énergie d'implantation. En effet, le pouvoir d'arrêt électronique et nucléaire augmentes avec l'augmentation de l'énergie jusqu'à la valeur

18 kev puis se stabilise avec l'augmentation de l'énergie d'implantation. Dans les deux cas, la relation qui exprime l'évolution des pertes est à la fois proportionnelle à la nature et au nombre des collisions qui se produisent durant l'implantation du phosphore. Du faite que les ions du phosphore sont lourd cela peut s'expliquer par le fait que la masse atomique de phosphore est importante (grande masse atomique).

Les deux tableaux suivant présents les paramètres intéressant variant avec les énergies des ions. Nous étudions le bombardement de la cible $SiN_{0.1}/SiO_2/Si$ avec le bore et le phosphore en relation avec les deux types de dopage.

Energie (kev)	5	8	10	15	18	20	25
Vacanciers Ions	67.2	98.9	117.8	158.9	180.8	194.3	224.3
Range projectile	99	142	169	230	256	287	337
Ionisation	32.61	37.79	40.59	46.20	48.85	50.46	54.03
Phonons	3.15	2.42	2.14	1.71	1.54	1.45	1.28
Phonons reculés	49.06	45.14	43.02	38.75	36.73	35.52	32.84
profondeur	550	1090	1150	1400	1500	1650	2200
Vacanciers reculés	2.37	2.30	2.23	2.07	1.99	1.93	1.81
Radial Range	155	223	265	362	416	451	529
Ion distribution	30.10^4	23.10^4	$18.2.10^4$	$14.1.10^4$	13.10^4	12.10^4	$10.2.10^4$
Ion Range	239	361	442	641	756	832	1019
Back scattered Ions	3925	2960	2565	1960	1719	1561	1262

TableauN3.1: TRIM data différents paramètres du bombardement ionique de l'ion bore de dopage $SiN_{0.1}/SiO_2$

Energie (kev)	5	8	10	15	18	20	25
Vacanciers Ions	89.5	139.2	171.2	248.0	292.4	321.4	391.6
Range projectile	35	48	57	77	89	96	115
Ionisation	11.61	13.07	13.95	15.82	16.80	17.43	18.86
Phonons	2.25	1.71	1.52	1.22	1.11	1.06	0.95
Phonons reculés	64.43	62.78	61.81	59.81	58.79	58.16	56.73
profondeur	360	400	500	600	700	990	1050
Vacanciers reculés	3.53	3.59	3.60	3.57	3.54	3.52	3.47
Radial Range	55	76	90	121	139	151	180
Ion distribution	$7.4 \cdot 10^5$	$5.5 \cdot 10^5$	$4.5 \cdot 10^5$	$3.5 \cdot 10^5$	$2.9 \cdot 10^5$	$2.8 \cdot 10^5$	$2.5 \cdot 10^5$
Ion Range	109	155	184	256	298	326	396
Back scattered Ions	321	274	256	188	187	185	137

Tableau N3.2: TRIM data différents paramètres du bombardement ionique de l'ion phosphore de dopage $SiN_{0.1}/SiO_2$

4.2- Simulation de création de lacunes

Les ions énergétiques: bore et phosphore pénètrent à l'intérieur du matériau, perdent leur énergie par deux processus presque indépendants: (i) perte d'énergie électronique (collisions inélastiques avec des électrons: Se) et (ii) perte d'énergie nucléaire (collisions élastiques avec des noyaux atomiques: Sn). Généralement, la contribution majeure du transfert d'énergie provient du Se lorsque les vitesses des ions en collision sont beaucoup plus grandes que la vitesse orbitale des électrons de la couche K de la coquille liés aux atomes cibles. De ce fait on introduit un damage ou une déformation dans la matrice. Ce processus crée des lacunes (vacanciers). La figure III-6 nous renseigne sur le nombre d'événements ou de postes vacants appelés communément défauts ponctuels ou défaut de Frenkel. Le nombre de ces défauts portés sur la figure 3.8 par l'axe des ordonnées dépend beaucoup de l'énergie cinétique des ions dopant atteignant la surface de $SiN_{0.1}/SiO_2/Si$.

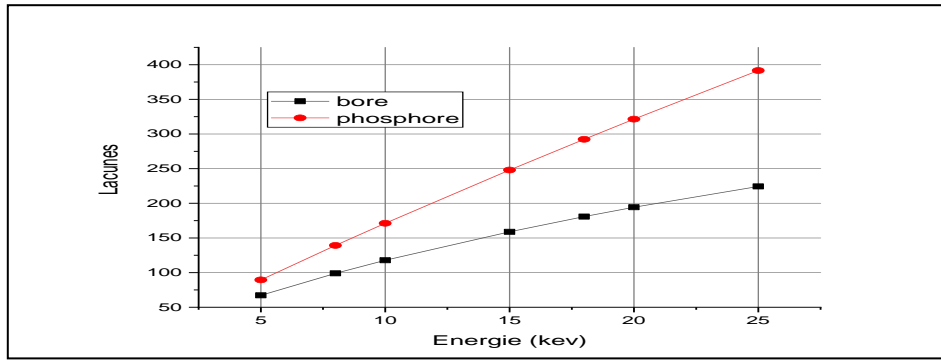


Figure 3.8 variation de perte d'énergie pour la création de lacunes pour les ions de bore et le phosphore dans la cible $SiN_{0.1}/SiO_2/Si$

Nous constatons que ce phénomène de création de lacune est plus prononcé pour les ions lourds présents dans cette simulation soit le bore ou le phosphore [9]. Pour ion de phosphore voit leur variation linéaire avec leur énergie cinétique respective. Pendant que La variation de ion de bore n'est pas linéaire avec la variation de leur énergie cinétique respective. Cette différence de profil de courbe provient des masses atomiques respectives des deux ions.

4.3– Simulation de création de phonons

En physique de la matière condensée, un phonon désigne un quantum d'énergie de vibration dans un solide cristallin : lorsqu'un mode de vibration du cristal de fréquence définie ν cède ou gagne de l'énergie, il ne peut le faire que par paquets d'énergie $h\nu$, h étant la constante de Planck. Ce paquet est considéré comme une *quasi particule*, à savoir une particule fictive appelée phonon. Le cristal est alors réputé échanger des phonons lorsqu'il perd ou gagne de l'énergie. Le phonon est une notion de mécanique quantique faisant appel au concept de dualité onde-corpuscule : selon le contexte expérimental, il peut se manifester soit comme une onde, soit comme un paquet élémentaire. Si l'étude des phonons prend une part importante dans la physique de la matière condensée, c'est qu'ils jouent un rôle important dans un grand nombre de propriétés physiques des solides dont : la capacité calorifique, ou capacité à stocker la chaleur ; la conductivité thermique, ou capacité à conduire la chaleur ; la conductivité électrique, ou capacité à conduire le courant électrique ; la capacité à propager le son. Sur la figure 3.9 on représente la variation de l'énergie dissipée pour la formation des phonons en fonction des énergies cinétiques respectives des deux ions sont le bore et le Phosphore dans la matrice $SiN_{0.1}/SiO_2/Si$.

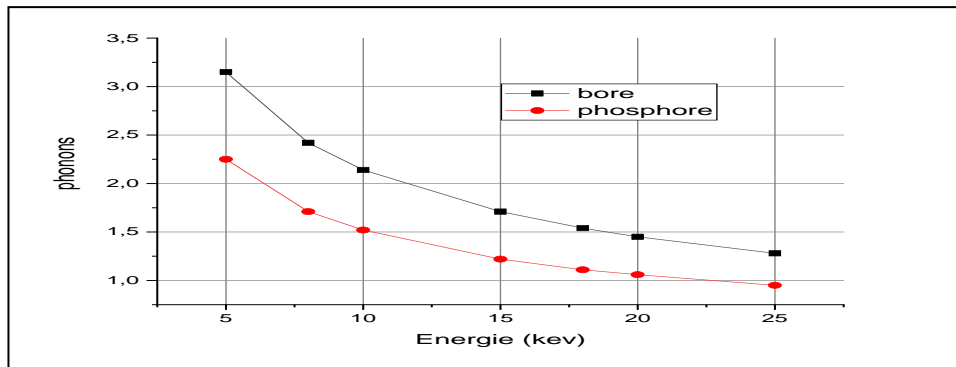


Figure 3.9 variation de perte d'énergie pour la création de phonons pour les ions de dopage de type N et de type P dans la matrice $SiN_{0.1}/SiO_2/Si$ en fonction des énergies cinétiques des ions.

On constate que cette énergie dissipée par création de phonons prend des valeurs maximum dans la région 0 jusqu'a 10 keV puis diminue exponentiellement avec l'énergie cinétique respectives des ions.

4.4- Simulation de perte d'énergie par ionisation

L'ionisation est l'action qui consiste à enlever ou ajouter des charges à un atome ou une molécule. L'atome ou la molécule perdant ou gagnant des charges n'est plus neutre électriquement. Il est alors appelé ion. Toute particule ayant plus d'électrons que l'atome ou que la molécule neutre reçoit le nom d'anion (elle a une charge nette négative). En revanche, les particules qui présentent moins d'électrons que l'atome ou que la molécule neutre sont les cations (elles sont chargées positivement). La figure 3.10 représente l'énergie dissipée par ionisations dans la matrice $SiN_{0.1}/SiO_2/Si$ [9]

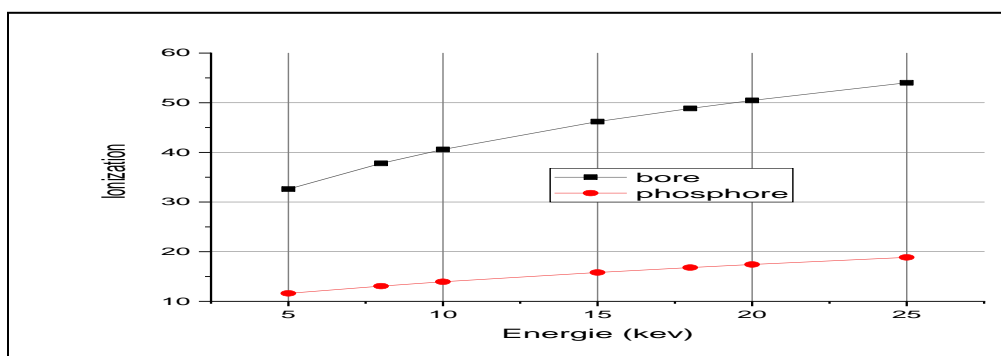


Figure 3.10 variation de perte d'énergie pour la création d'ions pour les ions de dopage de type N et de type P dans la matrice $SiN_{0.1}/SiO_2/Si$ en fonction des énergies cinétiques des ions.

Nous observons que l'ionisation augmente avec l'augmentation de l'énergie d'implantation pour le bore et le phosphore. Cependant, l'ionisation de l'élément de bore est supérieure à celle de l'élément de phosphore et cela est dû à la masse atomique des deux éléments, où la masse atomique du bore est petite tandis que la masse atomique du phosphore est grande.

4.5- Simulation des ions distribution

Nous voulons étudier comment les ions du bore et du phosphore sont distribués dans l'échantillon en termes d'énergie d'implantation, la figure 3.11 montre les variations des ions distribution en fonction des énergies d'implantation dans la cible $SiN_{0.1}/SiO_2/Si$.

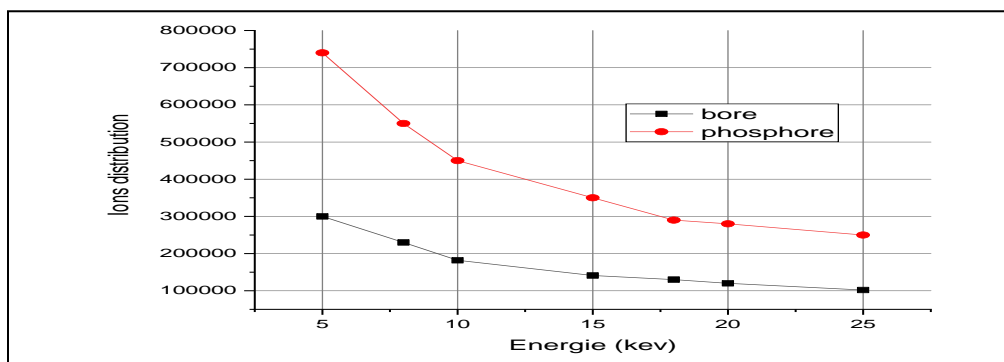


Figure 3.11 variation des ions distribution pour les ions de dopage de type N et de type P dans la matrice $SiN_{0.1}/SiO_2/Si$ en fonction des énergies cinétiques des ions.

Nous remarquons que les ions du bore et du phosphore sont distribués diminuent avec l'augmentation de l'énergie d'implantation.

4.6- Simulation des ranges projectiles des ions

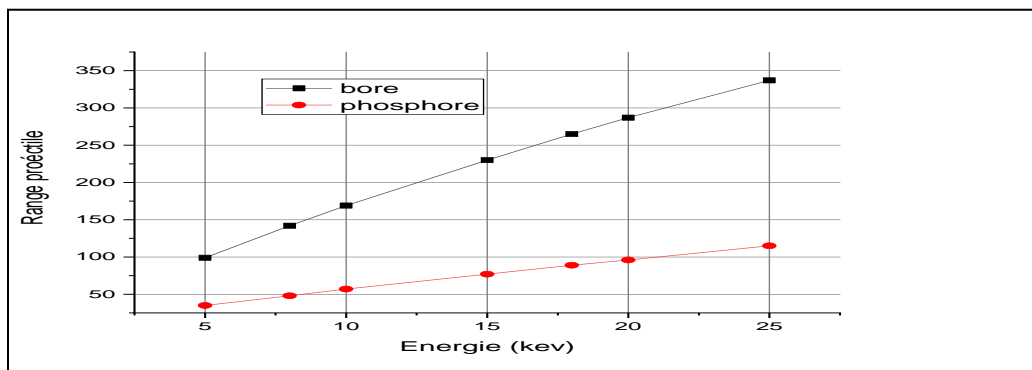


Figure 3.12: Variation du range projectile des ions de dopage N et P en fonction de leurs énergies cinétiques dans la cible $SiN_{0.1}/SiO_2/Si$

Sur la figure 3.12 on représente les variations du range projectile Rp. Il représente la distance moyenne atteinte par les ions dans la matrice du cristal. Le Bore est l'élément dopant qui atteint rapidement des grandes profondeurs dans la cible comparés au le phosphore .

4.7- Simulation de profondeur

La figure 3.13 présente les variation du profondeur des ions de dopage bore et phosphore en fonction des leurs énergies cinétiques dans la cible $\text{SiN}_{0.1}/\text{SiO}_2/\text{Si}$.

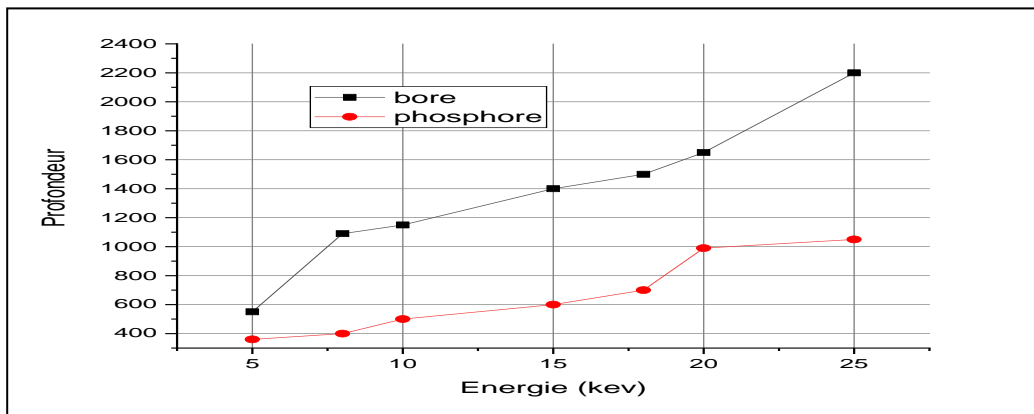


Figure 3.13: Variation du profondeur des ions de dopage N et P en fonction des leurs énergies cinétiques dans la cible $\text{SiN}_{0.1}/\text{SiO}_2/\text{Si}$

On note que la profondeur augmente avec l'augmentation de l'énergie d'implantation, mais cette augmentation est irrégulière. On note aussi que la profondeur atteinte par les atomes de bore est supérieure à la profondeur atteinte par les atomes de phosphore, et cela s'explique par le fait que la masse atomique de bore est petite et la masse atomique de phosphore est grande.

5 - Trajectoire des ions implantés dans la structure

Malgré la difficulté de la détermination de la trajectoire de chaque ion du bore en mouvement lors d'une implantation ionique, le calcul de Monté Carlo permet la prédiction du schéma suivi pour chaque ion, et finalement la distribution spatiale de tous les ions localisés dans la structure. Les figures 3.14 et 15. illustre les trajectoires des ions du bore et du phosphore dans la structure $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ en fonction de la stœchiométrie x de la cible.

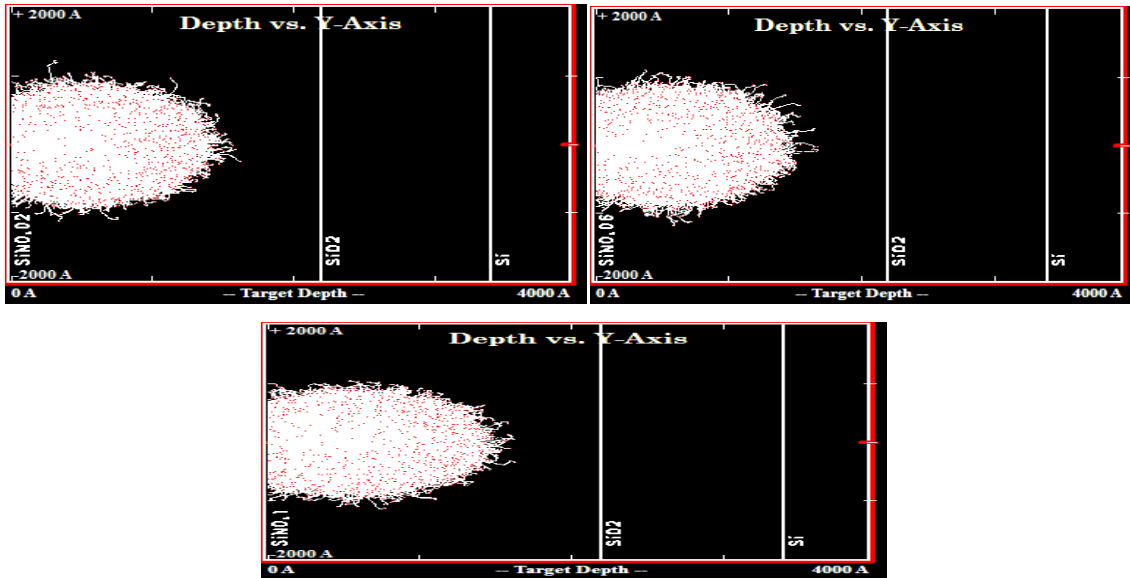


Figure 3.14: Simulation de la trajectoire du bore dans la structure $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$, pour des proportions de l'azote de 2%, 6%, et 10%, avec une énergie de 15 keV

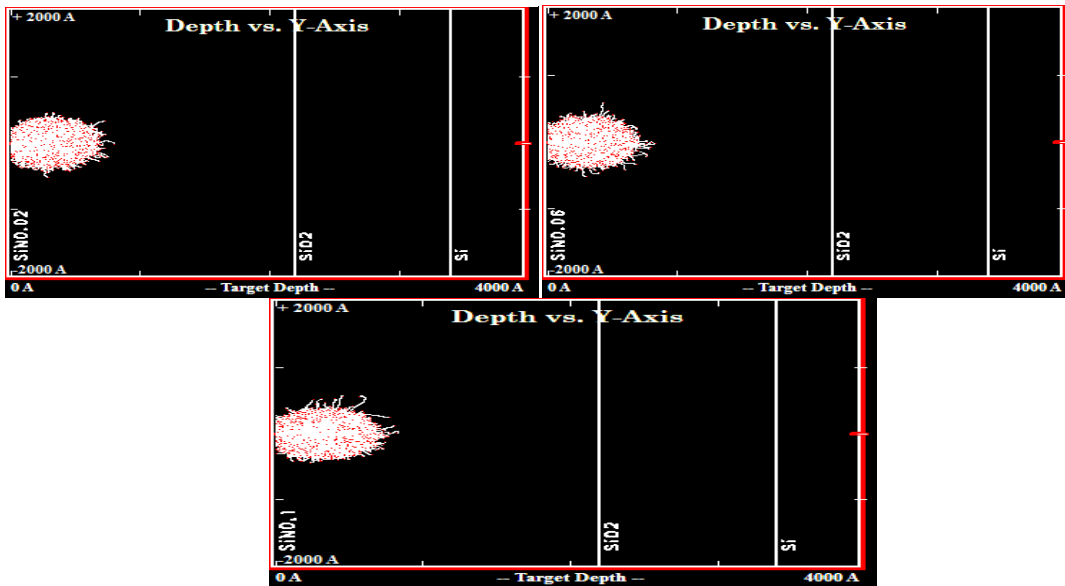


Figure 3.15 : Simulation de la trajectoire du phosphore dans la structure $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$, pour des proportions de l'azote de 2%, 6%, et 10%, avec une énergie de 15 keV

Nous observons que les ions implantés sont localisés dans une zone près de la surface de la couche mince (220 nm) et n'atteignent pas, pour toute la gamme du taux d'azote dans les films, la couche d'oxyde intercalée. Notons que la forme de la zone en présence des ions du bore est conservée pour les trois cas de dopage à l'azote,

contrairement à la profondeur de pénétration qui a tendance à diminuer avec l'augmentation de la concentration des impuretés d'azote dans la structure.

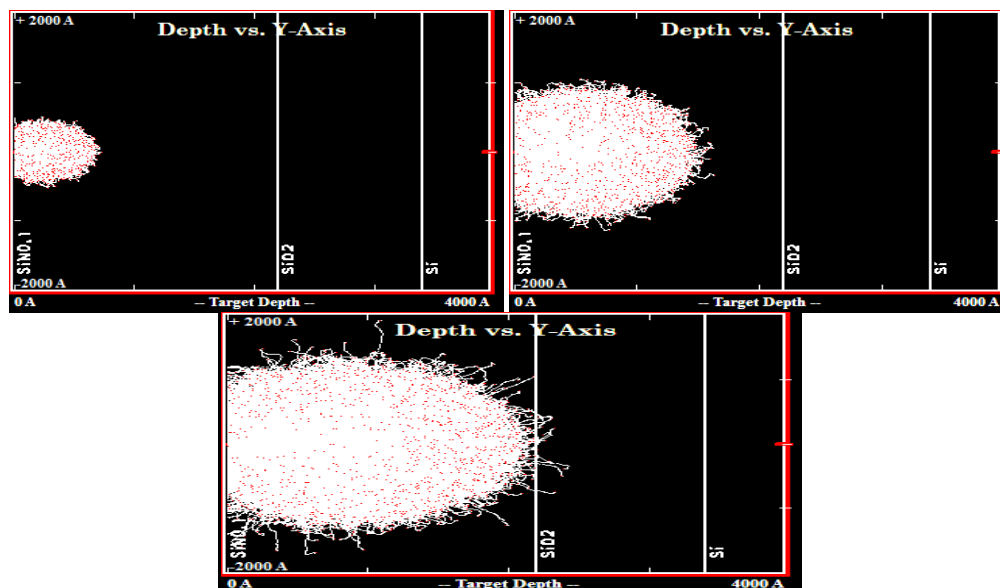


Figure 3.16 : Simulation de la trajectoire du bore dans la structure $\text{SiN}_{0.1}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, pour différentes énergies: (a) $E=5 \text{ keV}$, (b) $E=15 \text{ keV}$, (c) $E=25 \text{ keV}$

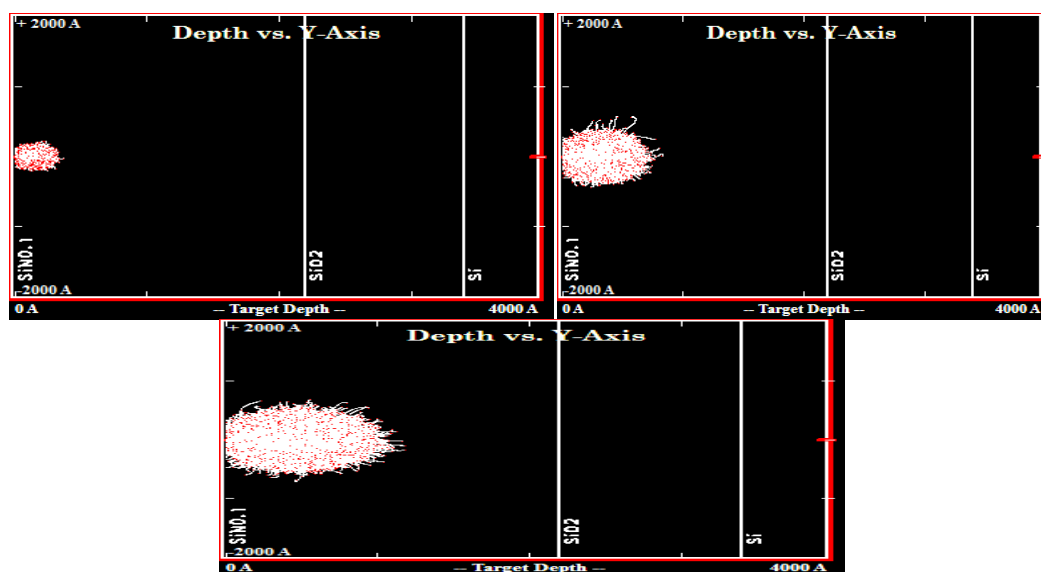


Figure 3.17 : Simulation de la trajectoire du phosphore dans la structure $\text{SiN}_{0.04}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, pour différentes énergies: (a) $E=5 \text{ keV}$, (b) $E=15 \text{ keV}$, (c) $E=25 \text{ keV}$

Sur les figures 3.16 et 3.17, nous présentons les résultats de la simulation relatifs à la variation des trajectoires en fonction de l'énergie d'implantation pour un taux d'azote de 10%. Nous observons, d'une part, que les ions implantés sont localisés toujours dans

une zone près de la surface pour la gamme d'énergies choisies, et d'autre part l'augmentation de la profondeur de pénétration avec l'accroissement de l'énergie d'implantation. En effet, un accroissement dans la valeur de l'énergie d'implantation influe considérablement sur le pouvoir de pénétration des ions de bore et de phosphore implantés.

Il est à noter que la simulation des trajectoires ne renseigne pas d'une manière efficace sur la distribution des espèces implantées en profondeur. Une simulation des profils de concentration s'avère donc nécessaire.

6 - Profils de concentration du bore dans la couche SiNx

6.1- Influence de la quantité d'azote dans la couche

La simulation des profils de concentration du bore dans la couche implanté joue un rôle important pour la maîtrise de la profondeur de pénétration de l'espèce implanté. En effet, ce contrôle permet entre autre, d'ajuster les gains en courant de transistors bipolaires et les tensions de seuil des transistors MOS (Métal Oxyde Semi-conducteur) durant les étapes de fabrication des circuits intégrés. En outre, il est possible de déterminer les paramètres décrivant la distribution, en particulier les deux premiers moments physiques. Les figures 3.18 à 3.19 présentent les profils de concentration du bore et du phosphore obtenuent par simulation.

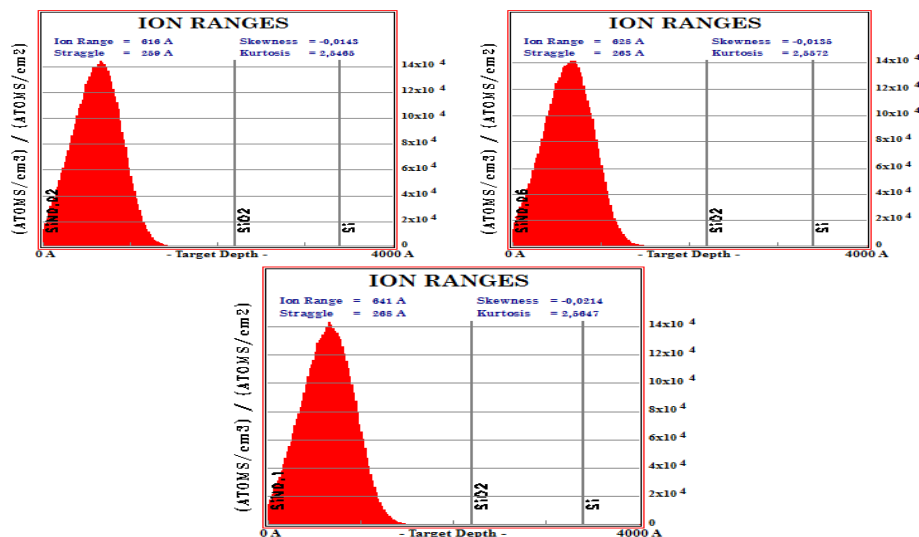


Figure 3.18 : Simulation des profils de distribution du bore dans la structure $SiN_x/SiO_2/Si$, pour les taux d'azote de 2%, 6%, et 10%, avec une énergie de 15 keV

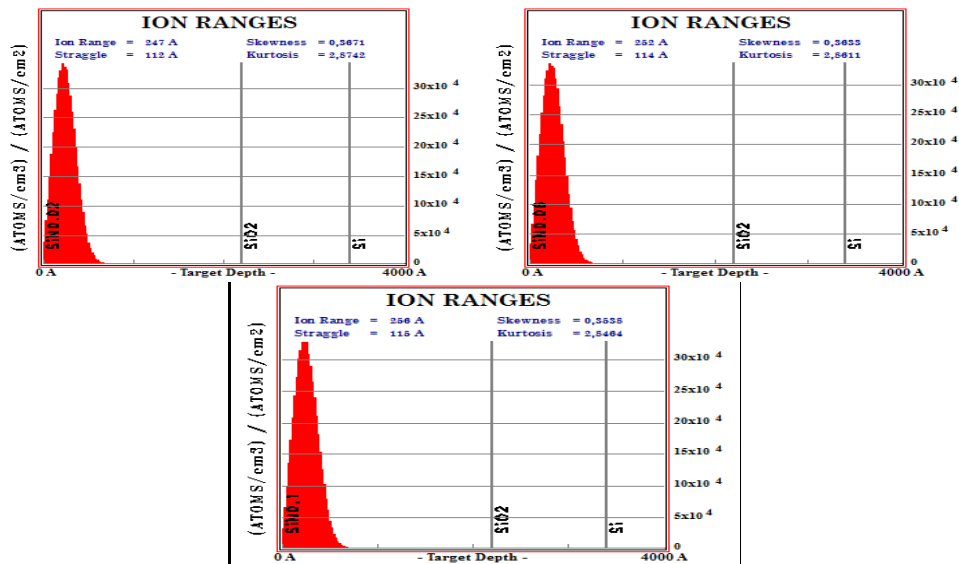


Figure 3.19 : Simulation des profils de distribution du phosphore dans la structure $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$, pour les taux d'azote de 2%, 6%, et 10%, avec une énergie de 15 keV

Nous remarquons que le profil Gaussien démarre par un certain niveau de concentration dépendant de la stœchiométrie considérée. Cette concentration montre la présence des atomes du bore en surface de la couche implantée après l'implantation. La concentration du dopant tend à augmenter jusqu'à ce qu'elle atteigne la profondeur moyenne de pénétration où elle devient maximale. A partir de là on observe une diminution graduelle (amortissement de la Gaussienne) de la concentration du dopant implanté.

6.2- Influence de l'énergie d'implantation

L'effet de l'énergie d'implantation sur la pénétration du bore et du phosphore, a été clairement observé à travers les résultats de simulation des trajectoires. Cet effet, doit être plus apparent sur les profils de concentration. Les figures 3.20 à 3.21 présentent les profils de concentration du bore obtenus par simulation.

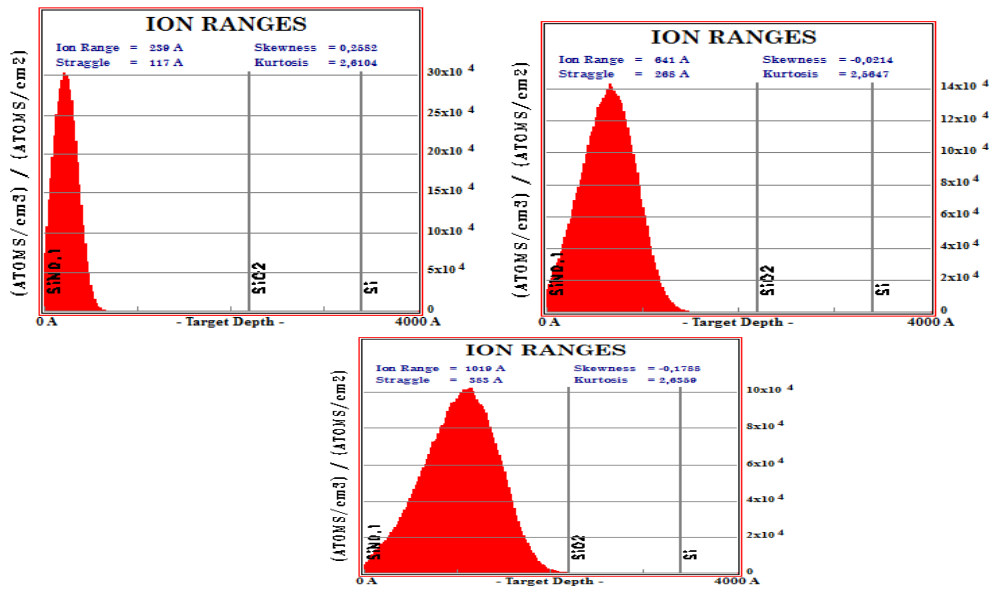


Figure 3.20: Simulation des profils de distribution du bore dans la structure $SiN_{0.1}/SiO_2/Si$, en fonction de l'énergie d'implantation :
 $E=5\text{ keV}$, $E=15\text{ keV}$, $E=25\text{ keV}$.

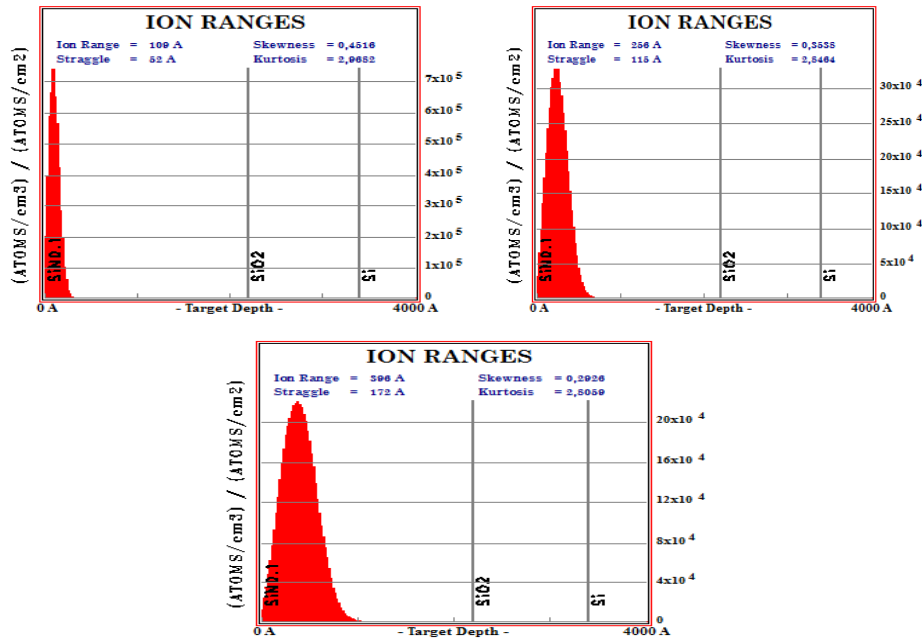


Figure 3.21 : Simulation des profils de distribution du phosphore dans la structure $SiN_{0.1}/SiO_2/Si$, en fonction de l'énergie d'implantation $E=5\text{ keV}$, $E=15\text{ keV}$, $E=25\text{ keV}$.

Les trois profils présentent une forme Gaussienne. Nous remarquons que chaque profil démarre à partir d'une certaine valeur de la concentration qui tend à diminuer avec l'augmentation de l'énergie d'implantation.

7 - Production des lacunes

La production des lacunes par implantation ionique peut être caractérisée par la distribution de ces lacunes dans la structure. Les figures 3.22 à 3.25 décrivent le phénomène en tenant compte du nombre des lacunes générées par Angström. Rappelons que lorsque l'énergie transmise à l'atome cible (par les ions de bore et de phosphore) est supérieure à l'énergie seuil de déplacement, l'atome de silicium est éjecté loin de son site et n'y revient pas immédiatement. De plus, dans le cas où l'énergie transférée à cet atome est suffisamment grande, l'atome cible peut à son tour déplacer d'autres atomes dits: atomes de recul.

7.1- Variation de la quantité d'azote dans la couche

On peut assimiler les distributions obtenues par des lois gaussiennes centrées à une profondeur R_L correspondant à la densité maximale des lacunes. Dans tous les points, le nombre des lacunes générées est directement proportionnel au nombre des collisions nucléaires produites en profondeur. On peut remarquer aussi que le nombre maximal des lacunes augmente en fonction du taux d'azote dans la couche.

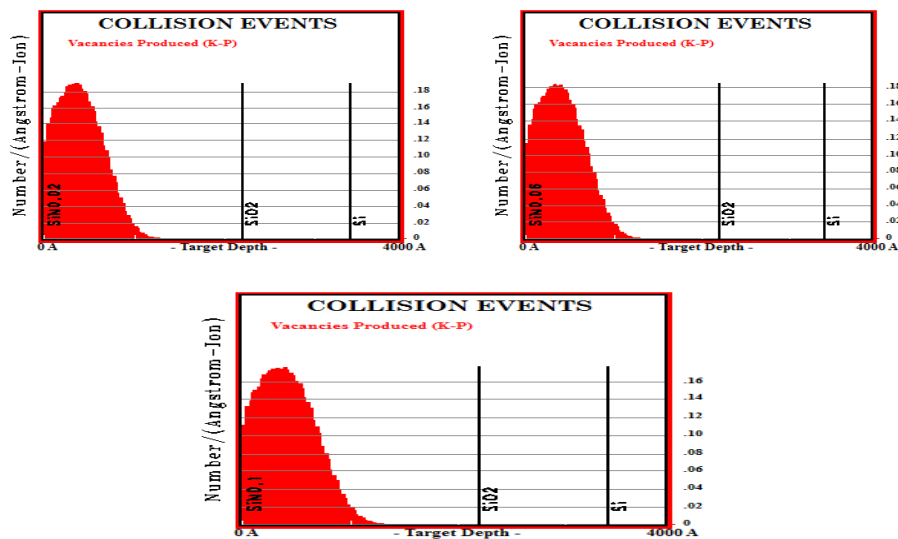


Figure 3.22 : Nombre de lacunes créées par implantation du bore en fonction de la quantité d'azote dans la couche SiN_x.

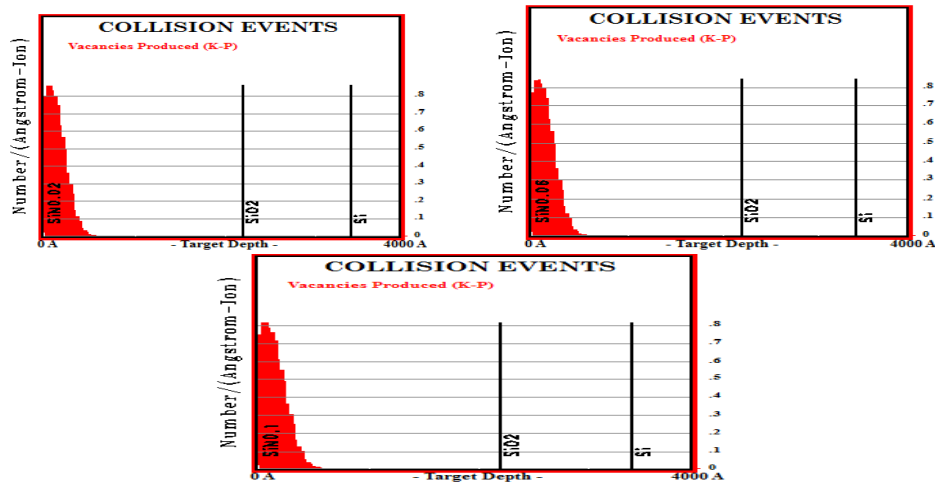


Figure 3.23: Nombre de lacunes créés par implantation du phosphore en fonction de la quantité d'azote dans la couche SiN_x .

7.2- Variation de l'énergie d'implantation

Les profils de les figures 3.24 et 3.25 présentent une forme gaussienne. La densité maximale des lacunes est située à la profondeur moyenne de distribution. Le nombre des lacunes générées dans ce cas est proportionnel à la variation de l'énergie d'implantation. On remarque en outre, un élargissement plus important quand l'énergie augmente. De même le nombre total des lacunes croît avec l'augmentation de l'énergie.

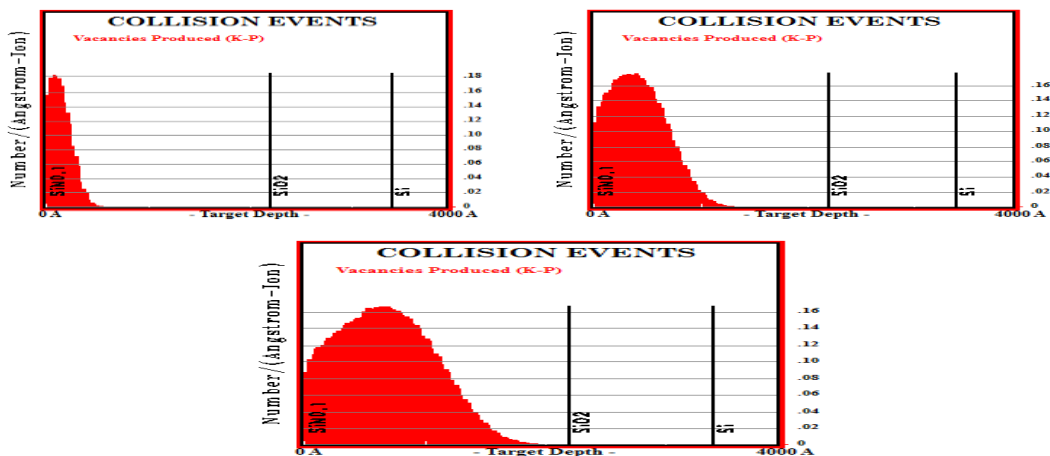


Figure 3.24 : Nombre de lacunes créés par implantation du bore dans la couche $SiN_{0.1}$ en fonction de l'énergie incidente des ions : $E=5keV$, $E=15 keV$, $E=25 keV$.

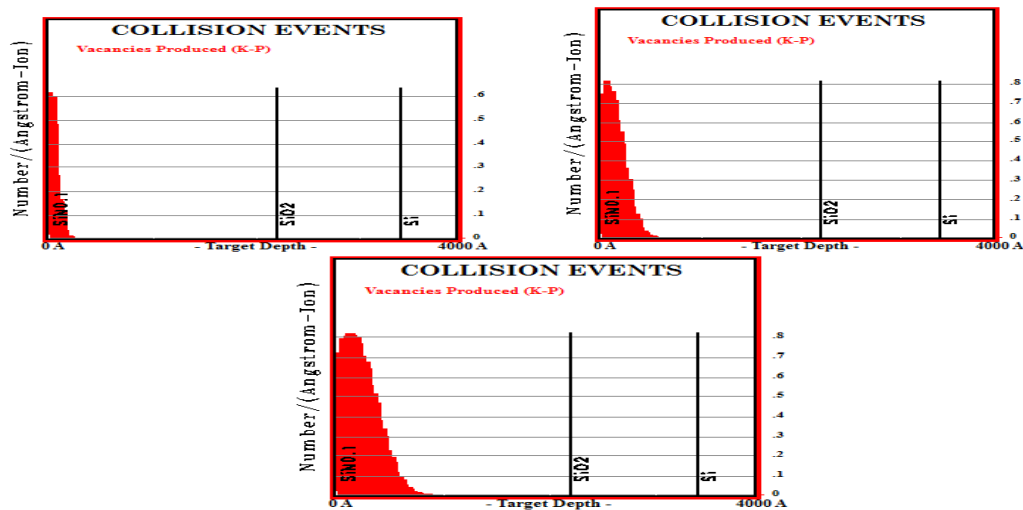


Figure 3.25 : Nombre de lacunes créées par implantation du phosphore dans la couche $\text{SiN}_{0.1}$ en fonction de l'énergie incidente des ions : $E=5\text{keV}$, $E=15\text{ keV}$, $E=25\text{ keV}$.

A travers l'ensemble de ces résultats, il s'avère que les lacunes sont distribuées dans la première couche (SiN_x), et que la profondeur moyenne de la distribution des lacunes est inférieure à la profondeur de pénétration du bore et du phosphore quel que soient le taux d'azote et l'énergie d'implantation.

8- Phénomène d'ionisation

Ce phénomène peut se produire lorsque la quantité d'énergie transférée par le choc inélastique est suffisante pour que l'atome libère un électron. Lorsque l'énergie transférée est importante, il est possible d'avoir plus d'un électron. Dans tous les cas, l'énergie interne de l'atome sera modifiée. Cet effet peut être causé aussi bien par les ions du bore et du phosphore que par les atomes du recul, comme il est montré dans les figures 3.26 et 3.27.

8.1- Variation de la quantité d'azote dans la couche

Une première observation sur les figures 3.26 et 3.27 permet d'affirmer que l'énergie perdue par les ions du bore et du phosphore est très grande devant celle perdue par les atomes de recul sur toute la profondeur de pénétration. Au début, chaque profil prend une valeur proche de la valeur au maximum, ceci montre que l'énergie perdue en surface peut être considérée comme importante. Au delà du pic, le profil commence à s'amortir graduellement montrant une plus faible influence de l'effet d'ionisation sur la perte d'énergie.

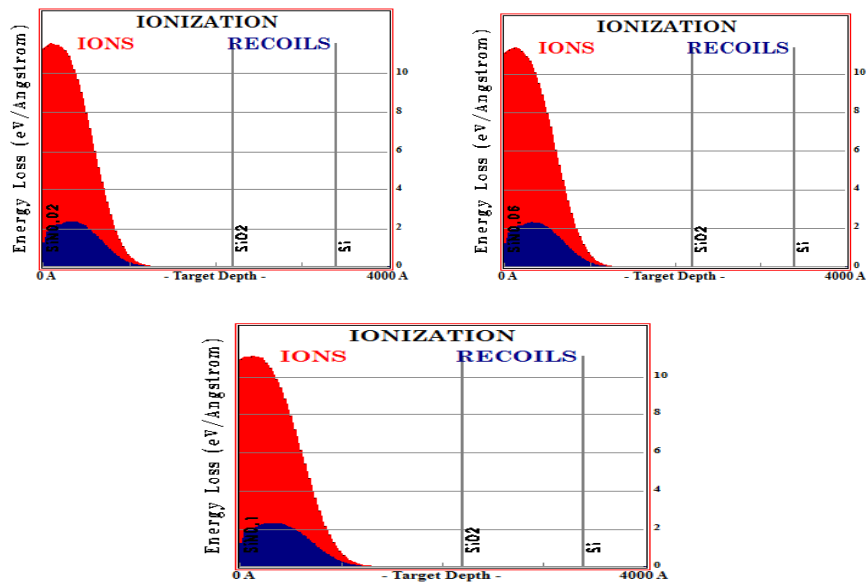


Figure 3.26 : Perte d'énergie par le phénomène d'ionisation dans la couche SiN_x par les ions projectiles et les atomes de recul du bore : Influence de la quantité d'azote

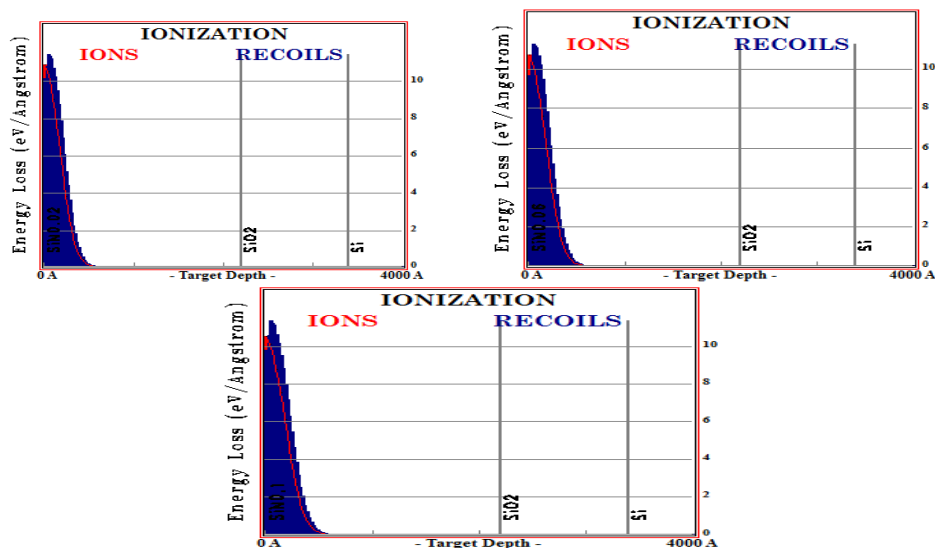


Figure 3.27 : Perte d'énergie par le phénomène d'ionisation dans la couche SiN_x par les ions projectiles et les atomes de recul du phosphore : Influence de la quantité d'azote

Nous observons aussi une proportionnalité entre la quantité d'énergie perdue et la proportion d'azote dans la cible. En effet, plus que le nombre des atomes d'azote augmente plus que la quantité d'énergie perdue augmente. Ce résultat mis en évidence la contribution des atomes d'azote dans le processus d'ionisation au cours de l'irradiation par faisceau d'ions.

8.2- Variation de l'énergie d'implantation

Les profils obtenus dans ce cas (figure 3.28) gardent la même forme que ceux représentés dans la figure 3.27 avec une dominance de l'effet des ions. Nous remarquons que l'énergie perdue en surface est importante et est maximale en profondeur moyenne pour chaque profil. Au-delà de cette région, une dégradation graduelle est observée. La quantité d'énergie perdue augmente en fonction de l'énergie incidente des atomes implantés mais demeure plus faible la comparant avec l'énergie d'implantation ionique.

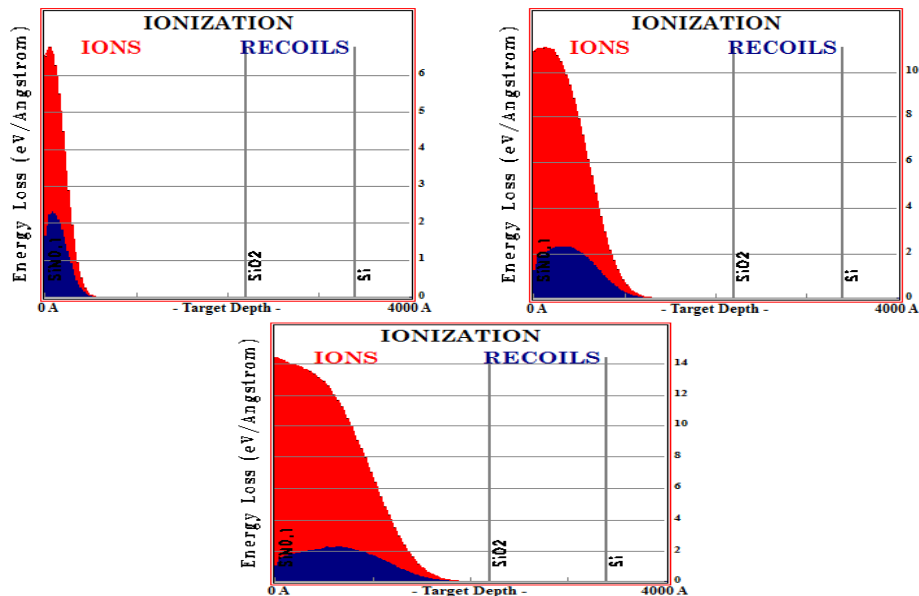


Figure 3.28 : Perte d'énergie par le phénomène d'ionisation du bore dans la couche $\text{SiN}_{0.1}$ par les ions projectiles et les atomes de recul : effet de la variation de l'énergie d'implantation : $E=5 \text{ keV}$, $E=15 \text{ keV}$, $E=25 \text{ keV}$.

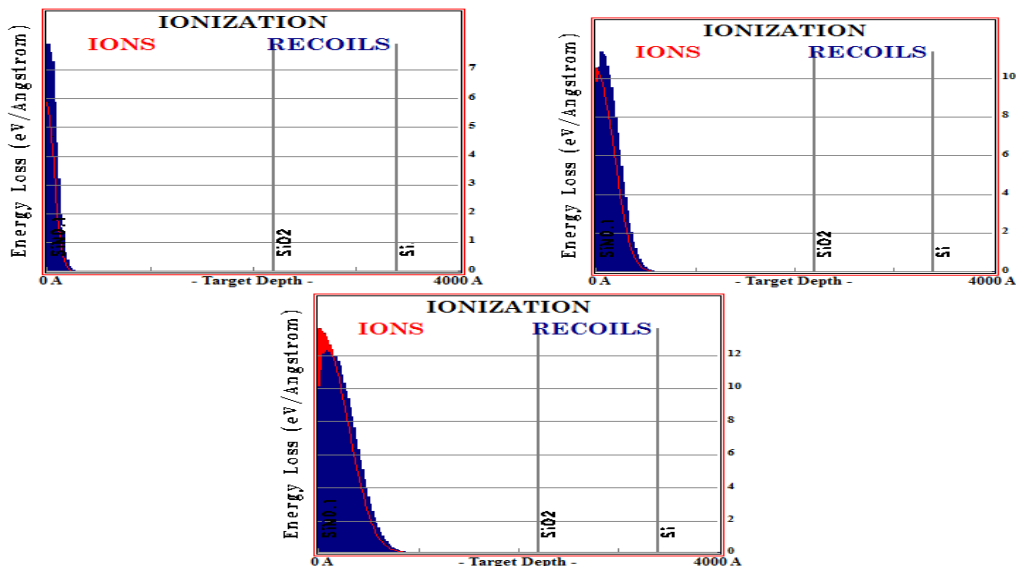


Figure 3.29 : *Perte d'énergie par le phénomène d'ionisation du phosphore dans la couche $\text{SiN}_{0.1}$ par les ions projectiles et les atomes de recul : effet de la variation de l'énergie d'implantation : $E=5 \text{ keV}$, $E=15 \text{ keV}$, $E=25 \text{ keV}$.*

A travers l'ensemble de ces résultats, il s'avère que l'effet d'ionisation apparaît dans la couche SiN_x quel que soit la quantité d'azote et l'énergie d'implantation et que le maximum de la perte d'énergie est situé à une profondeur inférieure à celle de la distribution du bore et du phosphore.

9- Conclusion

Nous avons étudié le long de ce chapitre, l'effet de la composition chimique de la cible et de l'énergie d'implantation sur la variation des profils d'implantation du bore et du phosphore dans le silicium dopé azote. Pour cela, une variété d'effets engendrés par l'implantation ionique ont été simulés. Les résultats ont montré qu'il est possible d'exprimer par utilisation du code TRIM, le freinage du bore par la présence d'azote dans le silicium. En effet, nous avons exprimé ce phénomène largement observé expérimentalement, en considérant un désordre plus important pour les cibles sujet d'un plus grand taux d'azote. L'ensemble des résultats dégagés de la simulation, montre qu'un choix judicieux des quantités d'azote et de l'énergie d'implantation permet d'ajuster la profondeur de pénétration du bore selon l'application visée.

Références

- [1] A. FopahLele, Etudes des nano-cavites en vue de la réalisation des matériaux alternatifs à base de semi-conducteurs. mémoire Master , Université de Yaoundé (2009).
- [2] F. Zeigler, J.P. Beirsack, U. Littman, 1985, The Stopping and Range of Ions in Solids, Pergamon Press, New York, version 2013
- [3] P-Alain . Patard, Outils numériques pour la simulation Monte Carlo des produits dérivés complexes. Université de Lyon, France (2007)
- [4] Y. Maneglia, analyse en profondeur des défauts de l'interface Si-SiO₂ par la technique du pompage de charges. thèse de doctorat, université de Grenoble France (1992)
- [5] N. Bettou Application de la méthode de Monte Carlo à l'étude de l'interaction rayonnement-matière codes TRIM et Casino. mémoire de Master ,Université Djilali Bounaama Khemis Miliana (2016)
- [6] A. Valour Synthèse d'oxyde de zinc dopé azote sous formes de poudre et de couche mince : caractérisation du type de semi conductivité. thèse de doctorat , Université de Rennes France (2017)

Conclusion générale

Conclusion générale

Grâce à ce travail plusieurs paramètres, liés à l'implantation ionique de l'antimoine dans le silicium, ont été étudiés. L'investigation a été réalisée par simulation.

Au cours de la simulation, plusieurs phénomènes ont été prévus. Nous avons étudié les phénomènes de collision entre les ions d'antimoine et une cible de Si amorphe. Les processus de perte et de transfert d'énergie ont également été prédits. Les différentes distributions des ions (en profondeur, latérale et à trois dimensions) ont été obtenues et plusieurs paramètres ont été estimés : le parcours projeté R_p , la déviation standard ΔR_p , le parcours latéral R_{\perp} , etc. L'étude de la formation de défauts a également été prise en considération. Nous avons pu obtenir les différentes redistributions possibles, à savoir : la production de lacunes, le phénomène d'ionisation et la création de phonons.

L'implantation des ions du bore et du phosphore dans les cibles $\text{SiN}_{0.02}$, $\text{SiN}_{0.06}$, $\text{SiN}_{0.1}$, l'élaboration des échantillons a été réalisée en utilisant une énergie d'implantation entre 5 keV et 25 keV.

Nous utilisons dans ce travail logiciel TRIM (Transport and Range of Ions in Mater) qui simule les interactions des ions avec la matière. Il utilise la méthode de Monte Carlo qui est un puissant outil mathématique permettant de résoudre beaucoup de problèmes liés aux phénomènes aléatoires comme les trajectoires des ions et des électrons dans la matrice solide de beaucoup de semi-conducteurs.

On sait que tous les semi-conducteurs sont utilisables après être dopés par les éléments chimiques de bore pour le dopage P et par le phosphore pour être dopés N. Les techniques de simulation des électrons et des ions bombardant une surface des matériaux est connue expérimentalement soit dans les MEB en tant que microscopie électronique ou dans le nettoyage des surfaces par les ions argon comme c'est le cas pour la majorité des échantillons semi-conducteurs avant de les introduire dans la chambre d'analyse pour les caractériser avec les techniques spectroscopiques.

Nous avons aussi constaté que le logiciel utilisé est un outil efficace pour la prédiction des éléments chimiques les plus performants pour le dopage de type N ou de type P de n'importe quel matériau avant de passer à la réalisation du dit dopage. Ce travail nous a permis aussi de comprendre beaucoup de phénomènes physiques et leurs théories et nous a donné un aperçu sur les applications des cours que nous avons appris auprès de nos enseignants de la physique théorique.

Conclusion générale

Les trois chapitres traités dans ce mémoire nous donne une idée claire sur la recherche scientifique et en particulier celle relative à la simulation des phénomènes physiques en relation étroites avec la physique théorique.

RESUME

Il existe plusieurs méthodes pour effectuer le dopage d'un matériau : le dopage par diffusion, le dopage par transmutation nucléaire, le dopage par la technique laser et le dopage par implantation ionique. La technique la plus développée est celle correspondant à l'implantation ionique. Cette dernière technique peut être simulée par le logiciel TRIM. Dans ce travail, en utilisant le logiciel TRIM (Transport and Range of Ions in Mater) élaboré par Ziegler, les deux types de dopage (P et N) ont été abordés en utilisant les éléments de la colonne V (dopage n) comme le phosphore et les éléments de la colonne III (dopage p) comme le bore du tableau périodique de Mendeleïev. Des effets physiques intéressants ont été simulés pour les deux types de dopage, on cite : la concentration du dopage, la perte d'énergie des ions dans la matrice du cristal, les ranges projectiles, les phonons reculés, les ions rétrodiffusés, les variations de ces paramètres ont été étudiés et des courbes ont été enregistrées. Des comparaisons des résultats ont été faites et discutées concernant les deux types de dopage.

Mots clé : dopage, implantation ionique, silicium, SRIM

ABSTRACT

There are several methods for doping a material: diffusion doping; doping by nuclear transmutation; doping by laser technique and doping by ion implantation. The most developed technique is that corresponding to ion implantation. This last technique can be simulated by the TRIM software (Transport and Range of Ions in Mater). In this work, using the TRIM software developed by Ziegler, the two types of doping (P and N) were approached using the elements of column V (doping n) like the phosphore and the elements of column III (doping p) like the bore of the periodic table of Mendelejev. Interesting parameters were simulated for both types of doping. The concentration of the doping, losses of the ions in the crystal matrix, the longitudinal of the ions ,phonons recoils, the backscattered ions are mentioned. The variation of these parameters has been studied and their curves recorded. Comparisons of results were made and discussed regarding both types of doping

ملخص

توجد العديد من الطرق لتطعيم المواد الشبه الموصلات: التطعيم عن طريق التحويل النووي، تطعيم بتقنية الليزر والتطعيم عن طريق قذف الأيونات ، إن التقنية الأكثر تطورا هي التطعيم بواسطة قذف الأيونات وإسكانها في المادة. يمكن محاكاة هذه التقنية الأخيرة بواسطة برنامج النقل ومدى الأيونات في المادة

(Transport and Range of Ions in Mater) (TRIM)

الذي طوره Ziegler.

تم تناول التطعيم النوعي باستخدام عناصر العمود الخامس مثل الفوسفور و كذا التطعيم النوعي باستخدام عناصر العمود الثالث مثل البور من الجدول الدوري لمنديليف .

من نتائج المحاكاة تم دراسة المعاملات متعددة ذات علاقة بالتطعيم بنوعيه نذكر منهم :حساب تركيز التطعيم ،فقدان الطاقة للأيونات داخل المصفوفة البلورية للمادة ،طاقات الأيونات الارجاعية ،الأيونات والأيونات المبعثرة،الفونونات .وتم دراسة تغيرات هذه المعاملات وتسجيل منحنياتها بدلالة طاقة قذف الايونات وتمت مقارنة النتائج المتحصل عليها ومناقشتها لكلا النوعين من التطعيم .