الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة محمد بوضياف - المسيلة

كلية: العلـــــــوم.
قسم : الفيـــــــزياء.
رقم: Ph/MAT/09/2023

ميدان: عـــلـــــــوم المادة
فرع: الفـــيزيـاء.
تخصص: فيزياء المواد

مذكرة مقدمة لنيل شهادة الماستر أكاديمـــي

إعداد الطالب(ة): علي منالله

تحت عنوان

توزيع الإشابة المزروعة في الشبكة مسبقة الإشابة

تمت المناقشة يوم 27 / 09 /2023 أمام اللجنة المكونة من:

سالمي محمد	جامعة المسيلة	رئيســـا
بوروينة هشام	جامعة المسيلة	مشرفا و مقررا
خريفي جلال	جامعة المسيلة	مناقشا
بوصندل عبد المجيد	جامعة المسيلة	مساعد مشرف

السنة الجامعية: 2023/2022

تشكرات

أتقدم بالشكر الجزيل إلى كل من ساهم من قريب أو من بعيد في إنجاز هذا البحث المتواضع، وأخص بالذكر الأستاذين بورويبة هشام و بوصندل عبد المجيد على إشرافهما و تتبعهما المستمر لي طيلة إنجاز هذا البحث و كذا نصائحه و إرشاداته القيمة و تشجيعهما لي طيلة مسيرة هذا البحث، كما أشكر فيه حبهما و تفانيهما في العمل و كذا فعاليتهما في طرح و معالجة المشاكل التي صادفتها طيلة مدة انجاز هذا البحث.

كما أتقدم بشكري الجزيل لأعضاء لجنة المناقشة و على رأسهم الأستاذ سالمي محمد على اهتمامه بالموضوع، و كذا على قبوله وتفضله برئاسة لجنة المناقشة.

و أتقدم بشكري الجزيل كذلك إلى الأستاذ ابرير الميلود عضوا ممتحنا، و أشكره جزيل الشكر على إرشاداته و نصائحه القيمة، و اهتمامه وحرصه على الموضوع، و كذا موافقته المشاركة في لجنة المناقشة.

منالله علي

الإهداء

اليك يا حبيبة القلب، يا من وضع الله سبحانه وتعالَّ الجنة تحت أقدامك، إليك يا أمي (**أُمِّي الحبيبة**).

نسير في دروب الحياة، ويبقى من يُسيطر على أذهاننا في كل مسلك نسلكه

صاحب الوجه الطيب، والأفعال الحسنة.

فلم يبخل عليَّ طيلة حياته

(**والدي العزيز**).

الى اخوتي و أخواتي

إلى أصدقاء التخصص جميعا : أسامة ، خالد ، عزيز ، سيد علي ، وأخص بالذكر صديقي و أخي **عمارة فؤاد** وجميع من وقفوا بجواري وساعدوني بكل ما يملكون، وفي أصعدة كثيرة

أُقدِّم لكم هذا البحث، وأتمنَّى أن يحوز على رضاكم.

علي منالله

الفهرس

التشكرات

الاهداء

مقدمة عامة ..... 2/1.

الفصل الأول : معلومات عامة حول الزرع الأيوني

1.1.المادة في الحالة الصلبة 1

1.1.1. المادة الصلبة غير بلورية 2

2.1.1.المادة الصلبة البلورية..... 3

1.2.1.1.مادة صلبة أحادية التبلور 3

2.2.1.1.مادة صلبة متعدد التبلور 3

2.1.الزرع الأيوني..... 3

1.2.1.مزايا و عيوب تقنية الزرع الأيوني. 5

1.1.2.1.أهم المزايا الأساسية للزرع الأيوني 5

2.1.2.1.العيوب الرئيسية لزرع الأيونات 6

3.1.نظريات تباطؤ وتوقف الأيونات في مادة 6

4.1. العوامل المؤثرة في زرع الأيونات 9

5.1.جرعة الزرع..... 11

الفصل الثاني : نظرية الزرع الأيوني

1.2.السيليسيوم..... 13

1.1.2.الاستخدامات الرئيسية للسيليكون: 15

2.2.الكربون..... 16

3.2.طريقة التحليل 17

1.3.2.قياس الطيف الكتلي الأيوني الثانوي(SIMS) 17

4.2.وصف عملية تفاعل أيون ذرة 21

5.2.نقل الطاقة..... 21

6.2.الاصطدامات النووية..... 22

7.2.الاصطدامات الالكترونية..... 24

8.2.التفاعل الأيوني الصلب 27

9.2.تباطىء و توقف الأيونات في الهدف..... 28
10.2.قدرة التوقف النووي 29
11.2.قدرة التوقف الالكتروني 30
12.2.البرامج المستعملة لمحاكاة ظاهرة الزرع الأيوني 30
1.12.2.برنامج SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter)..... 31
2.12.2.مبدأ التشغيل 33
3.12.2.الدخول و الخروج منSRIM 35

الفصل الثالث : دراسة نتائج المحاكاة

1.3.محاكاة التفاعل أيون-مادة و التنبؤ بالمعاملات الخاصة بالزرع الأيوني..... 40
1.1.3.استعمال برنامج SRIM 40
2.3.محاكاة القدرة على الإيقاف..... 41
1.2.3.القدرة على إيقاف الكربون في البنية SiNx/SiO2/Si 42
3.3.مسار الأيونات المزروعة في البنية**..... 45**
4.3.محاكاة بعض الظواهر الفيزيائية الخاصة بالتفاعل أيون-مادة 47
1.4.3.تأثير كمية الآزوت في الطبقة SiNx..... 47
2.4.3.تأثير طاقة الزرع..... 49
5.3.إنتاج الثغرات 50
6.3.ظاهرة التأين..... 52
7.3.إنتاج الفونونات..... 55

الخاتمة : 60
المراجع
الملخص

مقدمة عامة

مقدمة عامة

في مجال أشباه الموصلات ، تؤدي إضافة كمية صغيرة من الشوائب إلى مادة نقية إلى تعديل الموصلية ، و ترتبط خصائص أشباه الموصلات إلى حد كبير بعدد حاملات الشحنة التي تمتلكها. هذه الحاملات عبارة عن إلكترونات أو ثقوب، وتتمثل الاشابة من جلب ذرات مادة أخرى إلى مصفوفتها. تحل هذه الذرات محل بعض الذرات الأصلية ، مما يتسبب في مزيد من الإلكترونات أو الثقوب. هناك العديد من طرق الاشابة: الاشابة التحويلية النووية ، والاشابة بالليزر ، والاشابة بزرع الأيونات. زرع الأيونات هو أكثر التقنيات تطوراً. سنتعامل مع هذا الأخير ، هذه التقنية التي تحمل اسم (زرع الأيونات) سيتم محاكاتها بواسطة برنامج TRIM [2].

أصبحت تقنية زرع الأيونات أداة مفيدة للغاية في مجال تصنيع أجهزة أشباه الموصلات. إنه يمثل وسيلة لتعديل خصائص السطح لمجموعة متنوعة من المواد. يتم استخدامه في عدة مجالات. في الإلكترونيات الدقيقة ، إنها طريقة الاشابة وتصنيع أشباه الموصلات المثيرة للاهتمام مثل كربيد السيليسيوم (SiC). تستخدم هذه التقنية أيضًا في مجالات أخرى مثل السيراميك والمعادن والبوليمرات[3].

ينطوي زرع الأيونات على إدخال ذرات مؤينة من مادة ما بطاقة كافية لاختراق العينة المستهدفة (عادة ما تكون رقاقة). يسمح بالتحكم الدقيق في الكمية الإجمالية للذرات المزروعة (جرعة الزرع أو الطلاقة) وملف تركيز الأيونات المزروعة. كما أنه يجعل من الممكن تغيير الخصائص الكيميائية والهيكلية للهدف (غير شكل جزئي أو عام للهدف الذي يتطلب التلدين الحراري لإعادة التبلور)[4].

لتنفيذ هذه الدراسة، قمنا بهيكلة هذه المذكرة على النحو التالي:

الفصل الأول نقدم نظرة عامة لتقنيات الاشابة الكلاسيكية الرئيسية (الانتشار الحراري، في الموقع، التبادل الأيوني) وعلى وجه الخصوص زرع الأيونات ، مزايا و عيوبها وستكون المقارنة بين التقنيات المختلفة المقدمة

لموضوع هذا الفصل أيضًا. وأخيراً، نقدم نظريات تباطىء و توقف الأيونات في المادة و العوامل المؤثرة في زرع الأيونات.

الفصل الثاني سنقدم لمحة عن الدراسات السابقة و المتعلقة بالظواهر التي تحدث خلال التفاعلات أيون–مادة و ذلك خلال عملية الزرع الأيوني. سوف نقدم لمحة عن مميزات التقنية المستعملة، ثم نشير إلى أهم نظريات تباطؤ الأيونات في الهدف. في الأخير سوف ننهي هذا الفصل بإعطاء لمحة عامة عن البرامج المستعملة في المحاكاة من أجل التنبؤ بالظواهر الفيزيائية الخاصة بتباطؤ و توقف الأيونات في المادة أثناء استعمال هذه التقنية ألا و هو SRIM.

في سياق الفصل الثالث سوف نعرض مختلف النتائج المتحصل عليها بواسطة المحاكاة، ثم نناقشها نقطة بنقطة و نقارنها مع المراجع. في الأخير سوف نقترح خاتمة جزئية.

في الأخير ننهي هذه المذكرة **بخاتمة عامة** نثير فيها النقاط الأساسية. كذلك، سوف نقترح الآفاق الممكنة لهذا العمل.

معلومات عامة حول زرع الأيونات

الفصل الاول

مقدمة جزئية

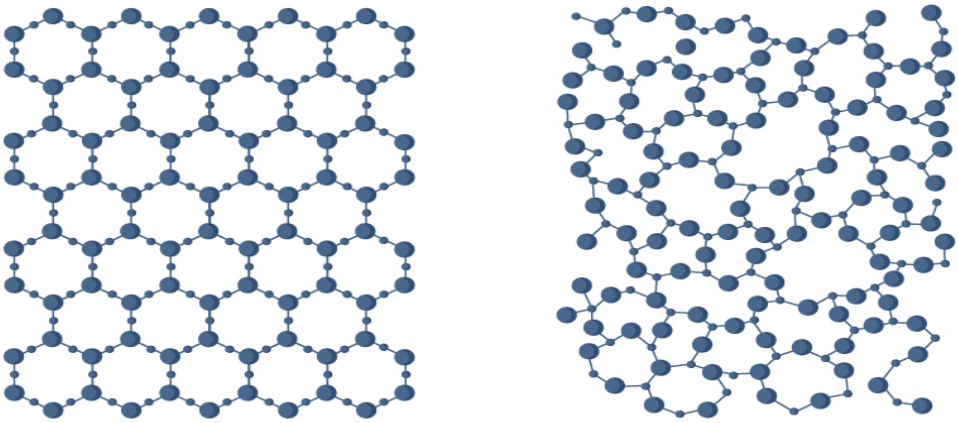
تعتبر الاشابة لأشباه الموصلات خطوة تكنولوجية مهمة للغاية لإنتاج الدوائر المتكاملة. غالبًا ما يتم إنتاجه عن طريق زرع الأيونات ، والذي له مزايا لا يمكن إنكارها على عملية الانتشار الحراري. في هذا العمل ، تم إجراء جميع العينات المستخدمة بواسطة زرع الأيونات .

خلال هذا الفصل الأول ، سوف نقدم نظرة عامة عن التقنية المعنية (أي الزرع الأيوني). سيتم النظر في العديد من المعلمات ، وهي: المزايا والعيوب ؛ المبادئ الفيزيائية وصف جهاز الزراعة الأيونية ، مزايا و عيوب التقنية وما إلى ذلك .

1.1.المادة في الحالة الصلبة

المادة الصلبة هي حالة من حالات المادة التي تتميز بخصائص معينة تجعلها تحتفظ بشكلها وحجمها الذي يمكن تحديده بشكل ثابت عند درجات حرارة وضغوط معينة. في المواد الصلبة، تكون جزيئات المادة مرتبة بشكل محدد ومترابطة بقوى جذب قوية، مما يجعلها تحتفظ بترتيبها البلوري أو الترتيب الجزيئي. هذا يعني أن المادة الصلبة تحتفظ بشكل ثابت وغير قابل للتغيير إلا عند تطبيق قوى خارجية كبيرة.

الأمثلة على المواد الصلبة تشمل العديد من المواد المألوفة في حياتنا اليومية مثل الحجر، والمعدن، والخشب، والزجاج. تختلف المواد الصلبة في الصلابة والكثافة واللون والخصائص الكهربائية والحرارية والميكانيكية وغيرها، وهذا يعتمد على التركيب الجزيئي وترتيب الجزيئات فيها وقد تكون بلورية او غير بلورية.



الشكل 1.1 : يمثل البنية البلورية والغير بلورية للمادة الصلبة

1.1.1. المادة الصلبة غير بلورية

المادة غير بلورية هي مادة صلبة لا تتوزع فيها الذرات توزيعًا منتظمًا في شبكة بلورية، وإنما يكون توزيع الذرات فيها عشوائيا ولكن على مسافات تكاد تكون متساوية، بمعنى أن توزيع الذرات فيها لا يتبع أي نظام من الأنظمة البلورية. توصف المواد غير بلورية أيضا بأنها زجاجية التركيب حيث أن الزجاج هو أشهر المواد غير بلورية إلى جانب السراميك والبورسلين والبلاستيك وقد تتسم المواد غير بلورية بشيء من النظام على النطاق القصير (حيز 10 – 20 ذرة) إلا أنها غير منتظمة على المدى البعيد ولهذا تسمى جوامد غير بلورية. مثال على ذلك بنية الزجاج والبوليسترين.[5]

2.1.1.المادة الصلبة البلورية

هي مواد صلبة تحتوي صفوفا من الذرات المتجمعة و المرتبة بشكل دوري مكونة تشكيلة ثلاثية الأبعاد و لذلك تملك نوعا من التماثل فيكون تركيبها عبارة عن تكرار نموذج أو خلية وحدة ثلاثية الأبعاد . هذه الدورية في الواد

المتبلورة تدعى ترتيب طويل المدى وتحتفظ البلورة التامة بهذه الدورية في أبعادها الثلاثة والى المالانهاية في كل محور.[6]

1.2.1.1.مادة صلبة أحادية التبلور

البلورة الأحادية هي نوع من المواد الصلبة التي تتميز بأنها تحتوي على ترتيب ذري أو جزيئي واحد متجانس ومنتظم في شبكتها البلورية. هذا يعني أنه في البلورة الأحادية، الذرات أو الجزيئات مرتبة بنمط ثابت ومتساوٍ في جميع الاتجاهات الثلاثة للمكان. تتميز البلورة الأحادية بأنها تظهر خصائص بلورية واضحة مثل وجود وجوه بلورية محددة وزوايا بلورية معينة.

2.2.1.1.مادة صلبة متعدد التبلور

البلورة المتعددة هي نوع آخر من المواد الصلبة تتألف من مجموعة من البلورات الأحادية المختلفة التوجه (الحبيبات) التي تتواجد بجوار بعضها البعض. في البلورة المتعددة، يكون لكل حبيبة هيكل بلوري خاص بها، والترتيب الذري أو الجزيئي يمكن أن يختلف بين الحبيبات المختلفة. يمكن أن تكون البلورات في البلورة المتعددة موجهة باتجاهات مختلفة وتظهر ترتيبات غير متجانسة.

2.1.الزرع الأيوني[7]

الزرع الأيوني هي عملية تكنولوجية تعتمد على إدخال ذرات مشحونة (القذائف) في المادة (الهدف)، و ذلك من خلال توفير طاقة كافية للأيونات لكي تستطيع التغلغل في الهدف و الوصول إلى منطقة بعيدة عن السطح. جهد تسريع الأيونات يمكن أن يكون بعض كيلو إلكترون فولط (keV) في حالة الزرع بواسطة البلازما و يصل إلى بعض ميغا إلكترون فولط (MeV) في حالة الزرع بطاقة عالية، بحيث تكون الجرعة المستعملة على العموم ما بين 10^{10} ion /cm^2 و 10^{18}ion /cm^2 لقد تم إدراج هذه التقنية في سنة 1951 عن طريق العالم شوكلي

(Schockley)(أحد مخترعي الترانزيستور) لتحل محل العملية التقليدية (الانتشار في درجة حرارة عالية) لتطعيم أنصاف النواقل. ففي الوقت الحاضر، تستخدم هذه التقنية على نطاق واسع في الصناعة الإلكترونية، من بينها إنتاج جميع أنواع الدوائر المدمجة. وقد تعداها إلى مجالات أخرى من بينها :

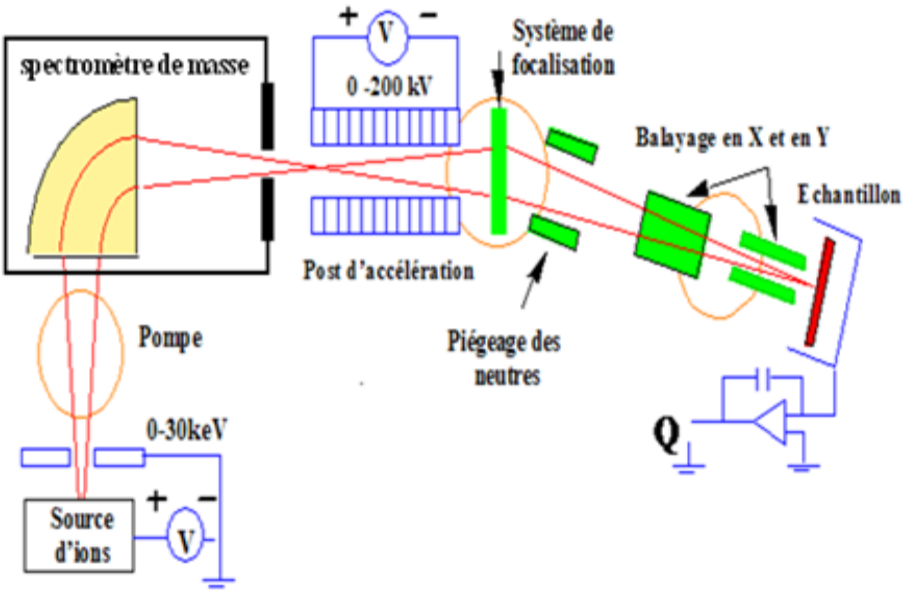
- مجال الالكترونيات الدقيقة بحيث تم استخدامه من أجل تطعيم أنصاف النواقل و خاصة في صناعة ترونزيستورات .

- مجال الخزفيات بحيث تم تطبيق التقنية من أجل تحسين الخواص الميكانيكية مثل الهشاشة و التصدعات التي تظهر على السطح .

- مجال البوليمير بحيث تم تطبيقها من أجل زيادة الناقلية الكهربائية حتى تصل إلى 14 مرة، مما تجعل البوليمير النصف ناقل يصبح ناقلا .

لإنجاز عملية الزرع نستعمل جهاز الزرع الأيوني ، الذي هو عبارة عن جهاز يوفر أيونات. بحيث هذه الأخيرة يجب أن تمتلك كتلة، جرعة و طاقة محددة بدقة. خلق الأيونات يحدث في المنبع انطلاقا من مركبات غازية أو عناصر معدنية متبخرة أو مقلوعة. في هذه المرحلة يتم إصدار الأيونات من طرف بلازما متكونة من غاز يحتوي على النوع المراد زرعه. هذا الغاز يأين بواسطة الكترونات منبعثة من سلك تم تسخينه بواسطة فعل الجول. في مخرج غرفة التأين يطبق حقل الكتروستاتيكي أولي يسمح باستخراج الأيونات. هذه الأخيرة تحتوي على كميات غير مهملة من الأيونات الغير مرغوب فيها(المحايدة). للتغلب على هذه المشكلة يتم تطبيق عملية الفصل بواسطة الحقل المغناطيسي، لأنها تسمح بالاختيار و الحصول على الأيونات التي تمتلك الكتلة و الطاقة المطلوبة. بعد

عملية التنقية و تسريع الحزمة بواسطة حقل كهربائي قوي، تمر الأيونات خلال أنظمة التبئير و المسح من أجل ضمان تجانس الجرعة على مستوى العينة المستهدفة.



الشكل 2.1: رسم تخطيطي لجهاز الزرع الأيوني

1.2.1. مزايا و عيوب تقنية الزرع الأيوني[8, 9]

ككل العمليات التكنولوجية، فإن تقنية الزرع الأيوني تمتلك مزايا كما تمتلك عيوب على حد سواء

1.1.2.1.أهم المزايا الأساسية للزرع الأيوني

- التحكم الدقيق في عدد وعمق اختراق الأيونات

- يمكن تجاوز حد الذوبان بشكل كبير (أي أنه لا يخضع لقوانين الديناميكا الحرارية)

- إمكانية إدخال عناصر غير قابلة للامتزاج في الهدف

- عملية بسيطة جدا

– المعلمات التي يجب إدارتها قليلة جدًا من حيث العدد: فهي كلها سهلة يمكن استنساخه والتحكم فيه بالتيار أو الجهد

– الطريقة تنطبق عمليا على أي نوع من الركائز و أي نوع من الشوائب

– يمكن قياس الكمية الإجمالية للأيونات التي يتم إدخالها بسهولة

– يتم تنفيذ التقنية عند درجة حرارة أقل من درجة حرارة الانتشار

– لا يوجد اختلاف في الأبعاد (أي يمكن تطبيقه مباشرة على الأجزاء النهائية)

– الاختراق الجانبي للأيونات في الركائز محدود (منخفض)

– يمكن تطبيقها مباشرة على أجزاء رقيقة

2.1.2.1.العيوب الرئيسية لزرع الأيونات

– ضرر لا مفر منه على الهدف أثناء تباطؤ الأيونات بواسطة التصادم المتتالي مع الذرات المستهدفة

– يجب أن تكون الأسطح المراد معالجتها خارجية أو معروضة بشكل مباشر للحزمة

– يجب أن يكون السمك المراد معالجته منخفض (<1 ميكرومتر)

– المعدات التقنية باهظة الثمن (اعتمادًا على الطراز، حيث سعر الجهاز الجديد يتراوح بين 3 حتى 6 مليون دولار)

3.1. نظريات تباطؤ وتوقف الأيونات في مادة

أثناء زرع الأيونات في الجسم الصلب، يمكن أن تحدث أربعة ظواهر فيزيائية مختلفة و ذلك عن طريق

التفاعل بين الجسيمات المشحونة الواردة مع الكترونات و أنوية ذرات الهدف(الشكل (3.1)

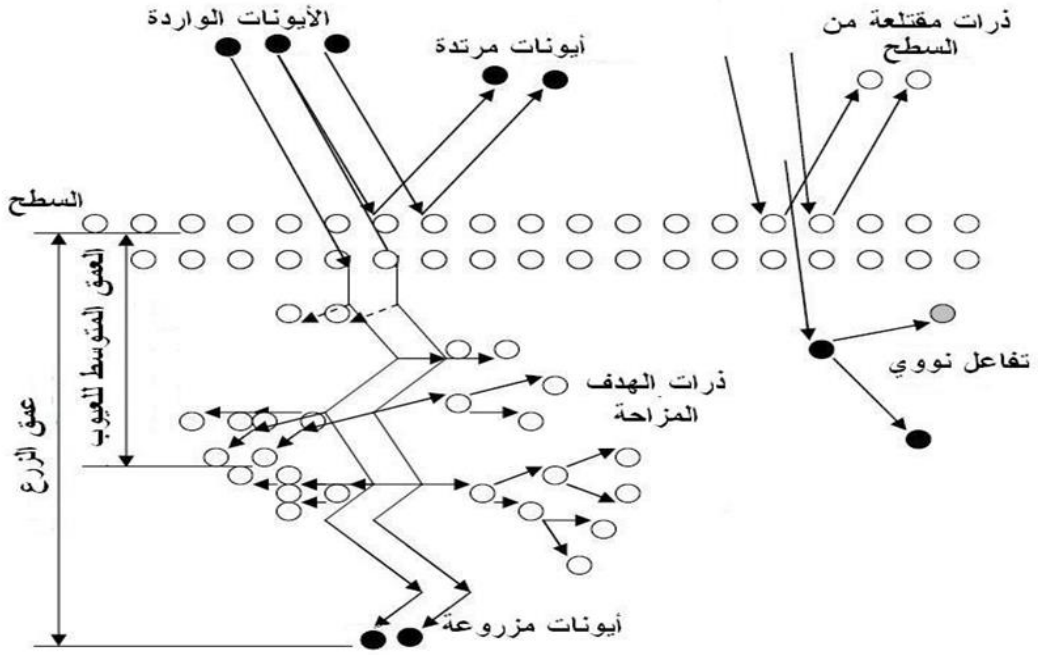
هذه الظواهر يمكن أن تكون :

- ❖ تصادمات مرنة عن طريق تحويل كمية الحركة لذرات الهدف
- ❖ تصادمات غير مرنة عن طريق إثارة و تأين ذرات الهدف
- ❖ إنتاج فوتونات
- ❖ حدوث مختلف التفاعلات النووية

وبالتالي فإن احتمال حدوث كل واحدة منها يتعلق بخصائص الجسيمات الواردة مثل الكتلة و الشحنة و الطاقة.

في حين يجب أن نلفت النظر إلى أن العمليتين الأخيرتين تحدثان عند الزرع بطاقة جد عالية

(عموما أكبر من GeV)[10]

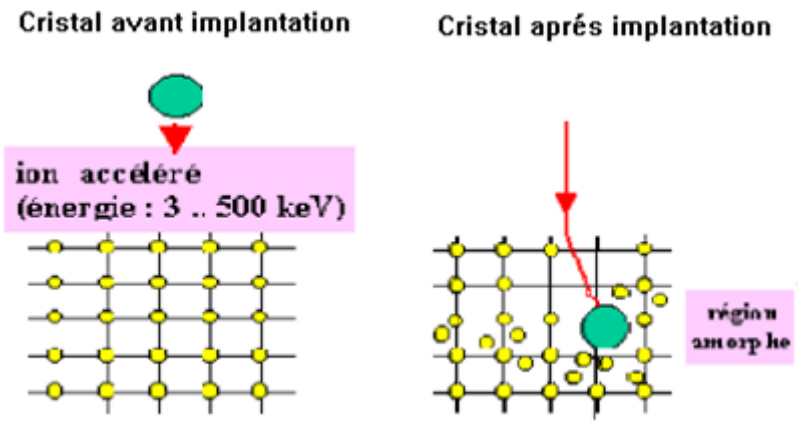


الشكل 3.1:مختلف الظواهر التي يمكن أن تحدث أثناء الزرع الأيوني في المادة الصلبة

فضلا عما سلف ذكره، فإنه من الواضح أيضا إمكانية حدوث ظواهر إضافية(الشكل(3.1)) تتعلق بـ :

- إنشاء عيوب في المادة المستهدفة، إذا كانت الطاقة المحولة بواسطة الاصطدامات النووية مع ذرات الهدف أكبر من طاقة الربط للمادة الصلبة. من جهة أخرى تستطيع كل ذرة بدورها إزاحة ذرات أخرى من خلال عملية متسلسلة، وبالتالي سوف يلحق أضرار بالمادة المستهدفة
- اقتلاع للذرات الموجودة على سطح العينة المستهدفة
- ارتداد الأيونات الواردة، إذا كانت كتلة الجسيمات الواردة صغيرة جدا مقارنة بكتلة ذرة الهدف
- قذف للخارج نواتج التفاعل النووي كإلكترون، الفوتون، الجسيمات الخفيفة و/أو الثقيلة

و بالتالي كنتيجة حتمية، فإن الأيونات الواردة التي تتغلغل في المادة المستهدفة سوف تخضع لتفاعلات مع المادة حتى استنفاذ طاقتها [11, 12].



الشكل 4.1:البنية البلورية للمادة المستهدفة قبل وبعد عملية الزرع

4.1. العوامل المؤثرة في زرع الأيونات

عملية زرع الأيونات هي تقنية تستخدم لإدخال ذرات معينة داخل مادة صلبة من خلال تسريعها وتوجيهها باستخدام شحنات أيونية. هناك العديد من العوامل التي تؤثر على عملية زرع الأيونات وتتحكم فيها، وتشمل:

1/نوع الأيونات وطاقتها: نوع الأيونات المستخدمة في عملية الزرع يلعب دورًا حاسمًا في تأثيرها على المادة المستهدفة. كل نوع من الأيونات يتفاعل بشكل مختلف مع المادة ويمكن أن يؤدي إلى تغييرات مختلفة في خصائصها. الطاقة الكينيتيكية للأيونات أيضًا تؤثر على عمق اختراقها داخل المادة.

2/طاقة الشحنة الأيونية: شحنة الأيونات تؤثر على الطاقة التي ينقلها الأيون وبالتالي عمق اختراقه داخل المادة المستهدفة. شحنات أعلى تسهم في زيادة الطاقة والتغلب على العقبات الذرية داخل المادة.

3/زمن الزرع: مدى مدة تعرض المادة لتأثير الأيونات يمكن أن يؤثر على كمية الأيونات التي تم زرعها وتوزيعها داخل المادة.

4/درجة حرارة الزرع: درجة حرارة المادة المستهدفة أثناء عملية الزرع تؤثر على تفاعل الأيونات مع المادة وعمق اختراقها.

5/طبيعة المادة المستهدفة: خصائص المادة المستهدفة، مثل البنية البلورية والتركيب الذري، تؤثر على تفاعل الأيونات معها وتأثيرها على خصائصها.

6/زاوية الدخول والتوجيه: زاوية دخول الأيونات وتوجيهها للمادة يمكن أن يؤثران على توزيعها وتأثيرها على المادة.

7/معالجات ما بعد الزرع: عمليات معالجة ما بعد الزرع، مثل التسخين أو التبريد، يمكن أن تؤثر على توزيع وتفاعل الأيونات داخل المادة.

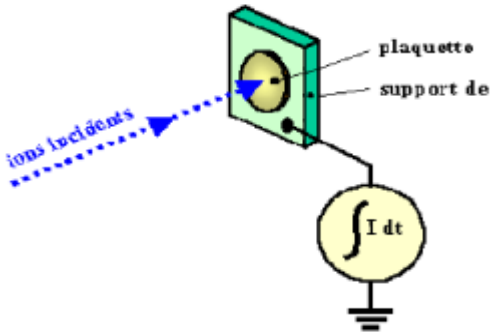
8/تكوين النفقات ومراقبة الجريان الأيوني: تصميم وتكوين النفقات التي يتم من خلالها تسليم الأيونات إلى المادة، بالإضافة إلى مراقبة الجريان الأيوني أثناء الزرع، يمكن أن يؤثران على نتائج العملية.

9/التحكم في عمق الزرع: من خلال تعديل العوامل المذكورة أعلاه، يمكن التحكم في عمق اختراق الأيونات داخل المادة المستهدفة.

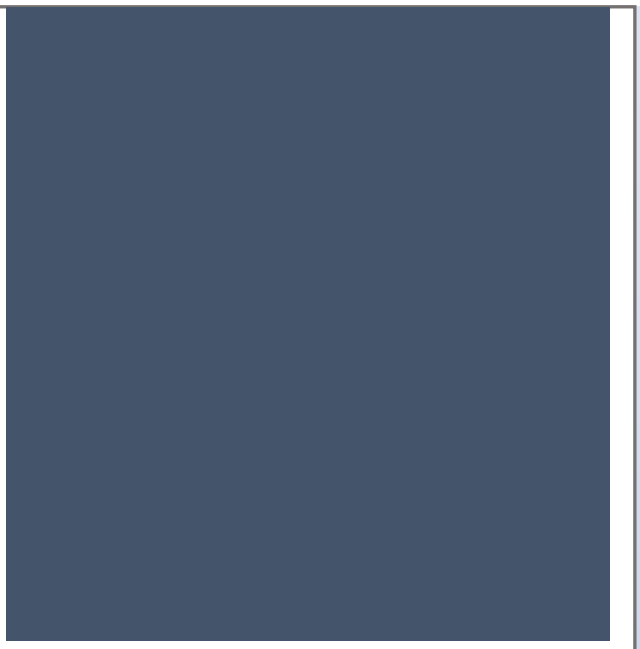
هذه عوامل متعددة تؤثر على عملية زرع الأيونات وتتحكم فيها. يمكن أن يكون البحث العميق والتجارب التكنولوجية ذات الصلة جزءًا مهمًا من فهم كيفية تحكم هذه العوامل في عملية زرع الأيونات وتطبيقها في مجموعة متنوعة من التطبيقات.

5.1.جرعة الزرع

يتم قياس الجرعة المزروعة بعدد الذرات لكل وحدة مساحة. هذا القياس ممكن لأن تدفق الأيونات الذي يصل إلى سطح العينة يتوافق مع التيار (الشكل 5.1) يتيح تكامل التيار لسطح محدد جيدًا على مدار فترة الزرع إمكانية قياس الجرعة. نحن نسمي بشكل عام الجرعة المزروعة



الشكل5.1: قياس الجرعة عن طريق تكامل التيار الأيوني على سطح معاير



الفصل الثاني

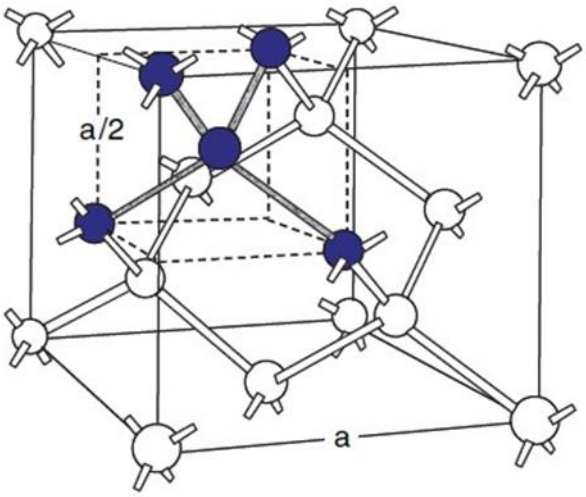
المقدمة

عملية التطعيم في أشباه الموصلات هي مرحلة تكنولوجية في غاية الأهمية في انجاز الدوائر المدمجة. فغالبا ما يتم تنفيذها بواسطة تقنية تدعى بالزرع الأيوني التي تمتلك مزايا لا يمكن إنكارها مقارنة بعملية الانتشار الحراري. على العموم، تصنف العناصر الأكثر استعمالا لتطعيم السليكون . في إطار هذا العمل، جميع العينات المدروسة هي من السليكون و لكي تصبح مادة شبه موصلة تم تطعيمها بواسطة تقنية الزرع الأيوني و ذلك بزرع أيونات (بحيث كل عنصر يتم زرعه بمفرده في العينة). و في سياق هذا الفصل، نحن بصدد عرض نظرة عامة عن التفاعلات أيون–مادة أثناء استعمال هذه التقنية بحيث عدة جوانب سوف نتطرق لها. هناك لمحة عن العناصر الكيميائية المستعملة في هذه العملية، الخصائص المميزة لهذه التقنية، نظريات تباطؤ وتوقف الأيونات في المادة.

و في الأخير، تطرقنا إلى الجزء الخاص بالمحاكاة. بحيث،قدمنا لمحة عامة عن البرنامج SRIM المستعمل من أجل التنبؤ بالظواهر الفيزيائية الخاصة بتباطؤ و توقف الأيونات في المادة أثناء استعمال تقنية الزرع الأيوني.

1.2.السيليسيوم

السيليسيوم هو العنصر الأكثر وفرة على وجه الرض بعد الأكسجين بنسبة 26 ٪ حيث يتواجد على نطاق واسع بشكل رئيسي على شكل ثنائي أكسيد السيليسيوم (SiO_2). له بنية بلورية شبيهة بالماس (شكل 2–1) مع معامل الشبكة البلورية 0.5430710 nm . توزيعه الالكتروني من النوع $[Ne]\ 3s^2\ 3p^2$ ينتمي الى المجموعة 14في الجدول الدوري للعناصر، و يرمز له بالرمز Si. ان السيليسيوم عنصر شبه معدني و صلب بلوري ،هو أحد العناصر الأساسية للحواسيب و التكنولوجيا الحديثة .



الشكل 1.2: البنية البلورية للسيليسيوم حيث تشكل الذرات الداكنة خلية الوحدة.

السيليسيوم لديه مجموعة من الخصائص الفيزيائية المميزة، وإليك بعضها:

1** .كثافة: الكثافة النوعية للسيليكون تتراوح بين $2.33\ g/cm^3$ إلى 2.34.

2** .نقطة الانصهار: نقطة الانصهار للسيليكون حوالي 1414 درجة مئوية (2577 درجة فهرنهايت).

3** .التوصيلية الحرارية: السيليسيوم لديه توصيلية حرارية عالية جدًا، مما يجعله مادة ممتازة لتبديد الحرارة في التطبيقات الإلكترونية.

4** .الموصيلية الكهربائية: السيليسيوم هو شبه موصل، وهذا يعني أنه يقلل من توصيل الكهرباء بشكل أفضل من الموصلات النقية ويزيد منها بشكل أفضل من العوازل.

5** .التوسع الحراري: السيليسيوم لديه توسع حراري معتدل، مما يعني أنه يمكنه التحمل والتعامل مع تغييرات درجات الحرارة دون تشوه كبير.

6** .مقاومة التآكل: السيليسيوم مقاوم للتآكل والأكسدة، مما يجعله مادة مناسبة للاستخدام في بيئات مختلفة.

7** .النصوص الكهربائية: السيليسيوم يمتلك خصائص نصوص كهربائية تؤثر في تفاعله مع الشحنات الكهربائية وتدفق التيار الكهربائي في مواده.

هذه مجرد نظرة عامة على بعض الخصائص الفيزيائية للسيليكون، وهناك المزيد من الخصائص التي تؤثر في استخداماته المتعددة في مجموعة واسعة من التطبيقات التكنولوجية.

1.1.2.الاستخدامات الرئيسية للسيليكون:

- تقنية الشبه موصلات: يُستخدم السيليسيوم على نطاق واسع في صناعة الشرائح الإلكترونية لصنع أجهزة إلكترونية مثل المعالجات الدقيقة وأنظمة الأتمتة والكمبيوترات والهواتف الذكية[13].
- أنودات البطاريات الليثيوم: يُعتبر السيليسيوم مادة أنودية جذابة للبطاريات الليثيومية نظرًا لانخفاض الجهد التفريغي لديه وللقدرة النظرية المعروفة للشحن. ومع ذلك، لديها تطبيقات محدودة بسبب تغير حجم السيليسيوم بنسبة 400٪ عند إدراج واستخراج الليثيوم، مما يؤدي إلى تحطيمها وتلاشي السعة[14].
- تصنيع أسلاك الكم الكمي: تظهر الأدلة غير المباشرة أنه يمكن تصنيع أسلاك الكم من السيليسيوم المستقل دون استخدام ترسيب موازي أو التصوير الضوئي. تستخدم الطريقة الجديدة خطوات كهروكيميائية وكيميائية لتحديد شبكات من الأسلاك المعزولة من وافرات البلوك[15].

❖ محاكاة الكمبيوتر: تُستخدم المحاكاة الكمبيوترية لدراسة الترتيب المحلي في الأطواق المكثفة للسيليكون. يقترح نموذج وظيفة الطاقة المحتملة التي تتألف من مساهمات ذراتين وثلاث ذرات لوصف التفاعلات في الأشكال الصلبة والسائلة للسيليكون[16].

2.2.الكربون

الكربون هو عنصر غير معدني ينتمي إلى المجموعة **(IVA)** في الجدول الدوري. لديه التوزيع الإلكتروني من النوع **(He) $2S^2 2p^2$** يوجد الكربون في الطبيعة على شكلين رئيسيين متآصلين:

– الجرافيت مع هيكل بلوري سداسي. إنه الشكل المستقر عند درجة الحرارة والضغط المحيط

– الماس بهيكل بلوري رباعي السطوح (هيكل من النوع "الماسي"). إنه الشكل المستقر عند درجة حرارة عالية وضغط مرتفع وقابل للاستقرار في درجة الحرارة والضغط المحيط

في الوقت الحالي ، أدى تطوير الأشكال الاصطناعية من الكربون ، مثل الأنابيب النانوية الكربونية **(CNT)**إلى توسيع مجال التطبيقات التكنولوجية لهذا العنصر.

بالإضافة إلى ذلك ، يعتبر دمج الكربون بواسطة تقنية زرع الأيونات في ركائز **Si** امرا مثيرا للاهتمام. في الواقع ، يسمح بتحسين الخواص الإلكترونية والميكانيكية للركائز المزروعة. في هذا السياق ، يمكن الإشارة إلى تكوين طبقات مدفونة من كربيد السيليسيوم **(SiC)** في السيليسيوم أحادي البلورية. يعتبر هذا المركب (أي **SiC**)مادة واعدة. إنه ذو أهمية خاصة في صناعة الإلكترونيات نظرًا لخصائصه الفيزيائية والإلكترونية المهمة. ويرجع ذلك إلى جوانب السيراميك وأشباه الموصلات لهذه المادة. في الواقع ، لديه موصلية حرارية عالية ، وفجوة واسعة في النطاق ، ودرجة حرارة انصهار عالية للغاية ، وجهد انهيار عالي. بفضل هذه الخصائص يتم استخدام **SiC** على نطاق واسع في تصنيع الأجهزة الإلكترونية للطاقة التي تعمل في درجات حرارة عالية وطاقة عالية وتحت إشعاع عالي جدًا[17]. وتشمل هذه الأجهزة [17]؛

- الثنائيات الباعثة للضوء على أساس كربيد
- كاشفات الصور القائمة على **SiC** (في المجالات العسكرية والفضائية) خاصة في نطاق الضوء الأزرق
- الأجهزة المتعلقة بالطاقات المتجددة
- التحكم في المحركات والاتصالات

كجزء من هذا العمل البحثي ، اقترحنا المساهمة في دراسة سلوك ذرات الكربون المزروعة في السيليسيوم أحادي البلورية. لا يتمثل هدفنا في تطوير **SiC** لأن جرعات الكربون المستخدمة غير كافية للحصول على هذه المادة. كان هدفنا بالأحرى دراسة العديد من التأثيرات المصاحبة لزرع الكربون في **Si** والتي تفيد الصناعيين الراغبين في تطوير **SiC** عن طريق زرع الأيونات

3.2.طريقة التحليل

1.3.2.قياس الطيف الكتلي الأيوني الثانوي(SIMS)

يعد التحليل الطيفي للكتلة الأيونية الثانوية **(SIMS)** تقنية تحليل سطحية فيزيائية كيميائية شديدة الحساسية. يعتمد على تشعيع الهدف المراد تحليله بواسطة الأيونات الثقيلة حيث تكون طاقة الحزمة الأولية بضع مئات من الإلكترونات فولت عند 50 كيلو فولت. ينتج عن تفاعل الحزمة الساقطة مع المادة تطاير الهدف على شكل جسيمات مشحونة أو غير مشحونة (أيونات أو جسيمات ثانوية). هذه الجسيمات المتأينة ، أثناء عملية الرش (أو أحيانًا عن طريق التأين اللاحق للجسيمات المحايدة المتطايرة) ، يتم ترشيحها في الكتلة (ربما في الطاقة) للوصول إلى تكوين العينة المستهدفة.

يتراوح معدل تآكل العينة أثناء تحليل **SIMS** بين **nm/s** 0.5 و 5 [18]. يعتمد ذلك على شدة الحزمة الأولية وحجم المسح وإمكانات الأيونات المتسارعة. لذلك فإن تحليل **SIMS** يخلق فوهة في العينة التي تم تحليلها ، وهو ما يفسر الطبيعة المدمرة لهذه التقنية. لهذا السبب ، من الأفضل (قدر الإمكان) إجراء قياسات **SIMS** بعد

إجراء جميع التحليلات بتقنيات غير إتلافية. خلاف ذلك ، يجب تخصيص قطعة عينة خاصة لهذا النوع من القياس.

توفر تقنية **SIMS** عدة أجزاء من المعلومات حول العينة [19]. في الواقع،

– يجعل من الممكن إجراء التحليلات الأولية لملف تعريف العمق (من نانومتر إلى ميكرومتر) على المواد الصلبة ذات الحساسية العالية جدًا (من جزء في المليون إلى جزء في البليون اعتمادًا على العناصر). على وجه الخصوص ، من الممكن تحليل توزيعات **dopants** في السيليسيوم.

– يوفر إمكانية العمل في مناطق محددة (<$\mathbf{50\mu m^2}$)

يسمح بالوصول إلى التحليل النظيري الأولي (أي استخدام النظائر وقياس النسب النظيرية للعنصر نفسه)

– يعطي إمكانية ، في ظل ظروف معينة ، لتحديد المركبات الكيميائية أو الأجزاء الجزيئية للمركبات الموجودة في المادة المراد تحليلها.

يوجد أدناه الرسم التخطيطي لجهاز تحليل **SIMS** (الشكل 2–**2**). وهي تشمل بشكل أساسي:

•عمود أيوني أولي (أو غرفة تأين): يتم تطبيق مسبار أيوني أولي على العينة المراد تحليلها. يتم تجهيز العمود المعني عمومًا بمصدرين ، ينتجان على التوالي أيونات من العناصر الكيميائية الكهربية (الأكسجين) لدراسة الأيونات الموجبة ، أو الموجبة للكهرباء (السيزيوم) لدراسة الأيونات السالبة.

•عمود أساسي لتركيز وتسريع الأيونات: يتكون من مغناطيس وعمود بصري أولي لتركيز وتسريع الأيونات التي تنتجها غرفة التأين.

•غرفة التحليل: حيث يتم إحضار العينة للجهد العالي.

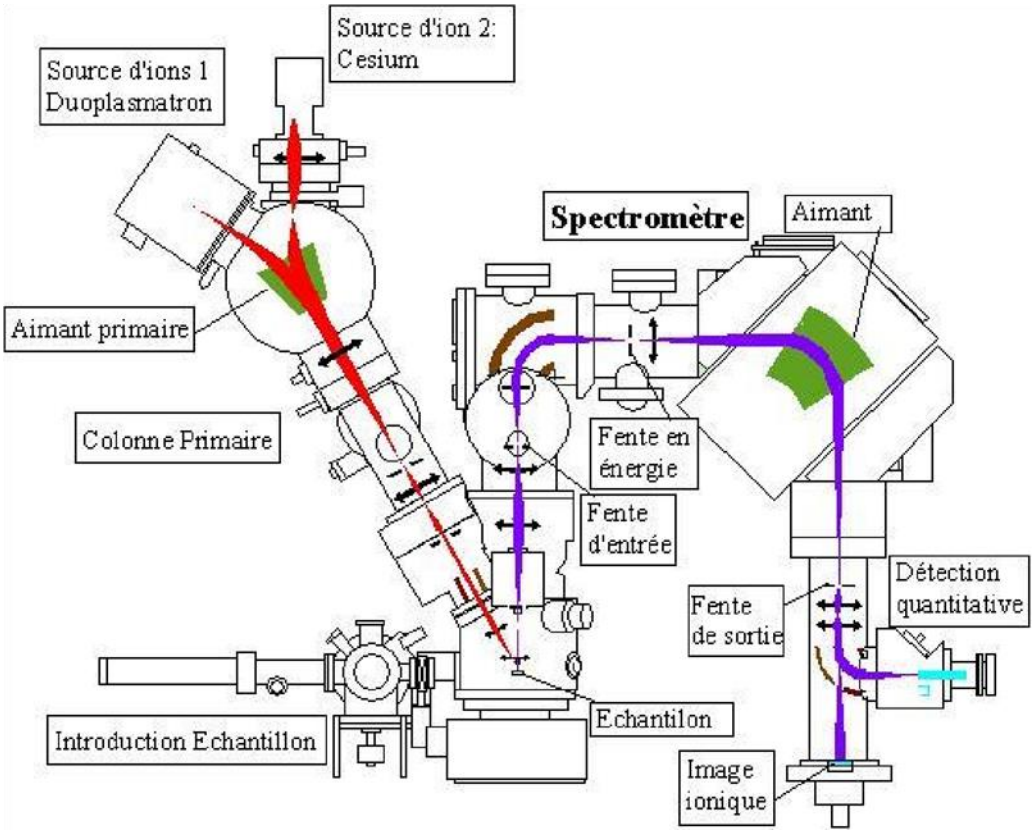
•نظام تسريع أيون ثانوي: تشكل الأيونات الثانوية من العينة مصدر المعلومات لتحليل .**SIMS** يتم تسريعها بواسطة جهد الاستخراج.

•عمود فصل ثانوي: يتم فرز الأيونات الثانوية من حيث الطاقة باستخدام مجال إلكتروستاتيكي ثم يتم فصلها بواسطة النبض باستخدام مطياف الكتلة المغناطيسية (الشكل 2−3).

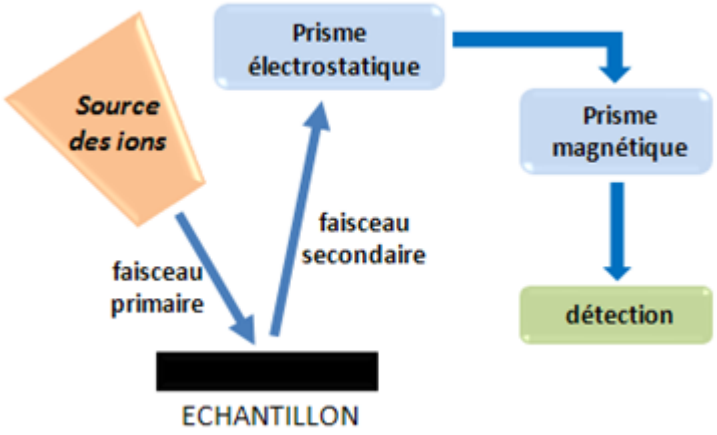
•عمود البصريات الأيونية: يتكاثر مباشرة عن طريق إسقاط الأيونات الثانوية على شاشة محول أيون الفوتون ، وهي صورة كيميائية لسطح العينة.

•حاوية التفريغ: تتعرض لضغوط مفرغة من التفريغ.**($<10^{-9}$ T)**

يتم تحويل شدة الحزمة الأيونية إلى تركيز الشوائب عن طريق المعايرة بعينة من نفس المادة تحتوي على تركيز أو جرعة معروفة من العنصر المطلوب. يتم تحليل هذه العينة في ظل نفس الظروف ويجعل من الممكن حساب النسبة بين التركيز وعدد الأيونات الثانوية المكتشفة.



الشكل 2.2: رسم تخطيطي لمطياف الكتلة الأيونية الثانوي



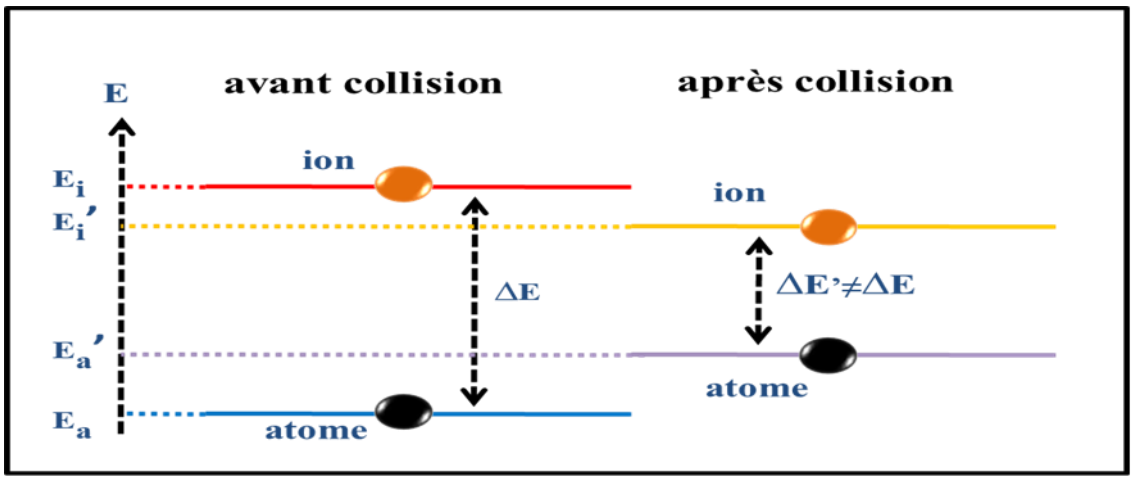
الشكل 3.2: مبدأ التحليل بواسطة تقنية SIMS

4.2.وصف عملية تفاعل أيون ذرة

عندما يتم زرع الجسيمات النشطة ، فإنها تخضع لسلسلة من الاصطدامات مع ذرات الهدف ، والتي تكون في البداية في حالة سكون. على الرغم من أن عملية التفاعل عشوائية للغاية ، إلا أنه من الممكن تفكيك هذه الاصطدامات إلى مجموعة تصادمات من نوع أيون ذرة. يعني التحلل المفروض مشاركة كلا الجسيمين في كل تصادم.

5.2.نقل الطاقة

من حيث الطاقة ، فإن القول بوجود تصادم بين الأيونات والذرة أي هناك انتقالًا للطاقة إلى الذرة المستهدفة. لذلك سيكون لدينا إعادة توزيع للطاقة على مستوى نظام الأيونات. يمثل الشكل 4.2 إجمالي مخطط الطاقة الحركية لنظام ذرة الأيونات قبل الاصطدام وبعده عندما تكون الذرة في البداية في مستوى طاقة Ea.



الشكل 4.2: رسم تخطيطي للطاقة الحركية الكلية لنظام أيون ذرة قبل و بعد التصادم

يمكن التعامل مع تصادم الأيونات والذرة في نظامين ، النظام المرجعي لمختبر SL ومركز SCM للنظام المرجعي الشامل. للراحة ، يفضل الفيزيائيون استخدام SCM.

عادةً ما يتم تقسيم نقل الطاقة إلى الذرة بأكملها (النواة والإلكترونات) أثناء تفاعل الجسيمات والذرة المشحونة إلى جزأين: من ناحية ، الجزء المرن المسؤول عن ضبط حركة مركز كتلة الذرة ، ومن ناحية أخرى ، الجزء غير المرن الذي يتوافق مع تعديلات التكوينات الإلكترونية للشريكين

من المفترض أن فقدان الطاقة للأيون يحدث فقط وفقًا للآليتين المستقلتين التاليتين [20]:

- ❖ فقد الطاقة بسبب الاصطدامات المرنة بسبب الشحنات النووية. يشار إليه أيضًا باسم فقد الطاقة النووية وهو مجموع الأجزاء المرنة من إجمالي نقل الطاقة للأيون.
- ❖ فقدان الطاقة الإلكترونية الناتج عن التفاعل غير المرن بين الأيون وإلكترونات الذرة المستهدفة تمثل هذه الأجزاء مجموع الأجزاء غير المرنة من إجمالي نقل الطاقة للأيون.

6.2.الاصطدامات النووية

هم الأهم في نهاية مسار الأيون في المادة (الأشكال6.2 و7.2) أي طاقات الحوادث المنخفضة. يمكن مقارنة التصادم النووي بين أيون وذرة بالتصادم بين كرتين من كرات البلياردو. أثناء التفاعل ، هناك حفظ للطاقة الحركية الكلية للنظام مما يؤدي إلى انتقال الطاقة بين الجسيم الساقط والهدف ثم ' نتحدث عن تصادم مرن ينتج عن هذا تباطؤ وانحراف زاوي للأيون. تتيح علم الحركة إمكانية تقدير الطاقة القصوى المنقولة أثناء الاصطدام:

$$E_{max} = 1\frac{4M_1M_2}{(M_1+M_2)^2}E \qquad (1)$$

مع:

M1:كتلة الأيون الساقط

M2:كتلة الذرة المستهدفة

E: طاقة أيون الحادث

يتم قياس احتمالية حدوث تفاعل أثناء تصادم بين أيون وذرة بواسطة مقطع عرضي (**σ**). هذا الأخير يعتمد بشكل مباشر على الإمكانات من التفاعل. تصف هذه الإمكانات تفاعلات الكولومية بين النوى. من خلال النظر في حالة أيون الضوء السريع ومع معاملات التفاعل الصغيرة ، نجد أنفسنا في سياق إمكانات كولوم بحتة. يتم بعد ذلك كتابة المقاطع العرضية التفاضلية ، أي احتمالات مراقبة جسيم منحرف تحت زاوية صلبة وفي فاصل طاقة معين:

$$d\sigma_n = 2\pi \frac{Z_1^2 Z_2^2 e^4}{M_2 v^2} \frac{dET}{ET^2} \qquad \text{pour } E_T < E_{max} \qquad (2)$$

مع :

dσn: المقطع العرضي التفاضلي

ET: الطاقة المنقولة أثناء الاصطدام

E_{max}: أقصى طاقة يمكن نقلها أثناء الاصطدام

v: سرعة أيون الحادث

Z1: العدد الذري للجسيم الساقط

Z2 :: العدد الذري للذرة المستهدفة

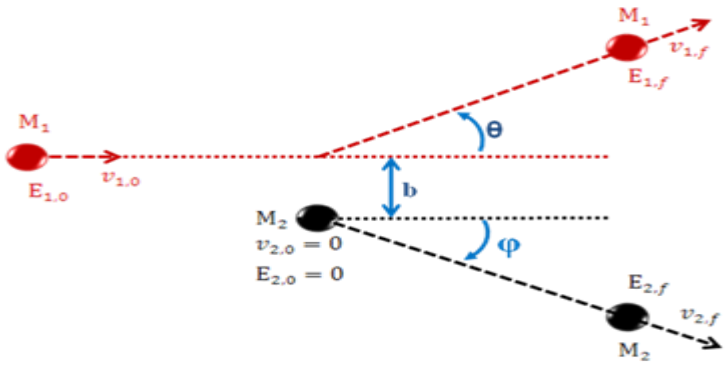
e $^2 = \frac{q^2}{(4\pi\varepsilon_0)}$: (**q**) هي شحنة الإلكترون و **ε0** هي سماحية الفراغ)

يتيح تحديد المقاطع العرضية التفاضلية الحصول على المعلومات التالية :

عدد الذرات التي تم تحريكها خارج موقعها الأولي (ذرات الارتداد). لهذا الإزاحة فعالة ، بحيث لا يوجد إعادة تركيب ، يجب أن تكون الطاقة المنقولة إلى الذرة أكبر من الحد الأدنى لقيمة السماح باستخراجها من موقعها على الرغم من بيئة. هذه القيمة تسمى طاقة الإزاحة. لا يُعرف سوى بقليل من المواد النموذجية ، ولكن لم يتم قياسه من قبل. ستخلق الذرات النازحة عيوبًا تتكون من شواغر – أزواج

خلاليّة ، أي عيوب فرنكل. إذا قام الأيون بنقل طاقة كافية إلى الذرات ، فإن الأخير سوف يتفاعل بدوره مع الذرات التي تحيط بها ويخلق ما يسمى سلسلة من الإزاحات (أو الاصطدامات). إذا حدث هذا بالقرب من السطح ، يمكن لذرة واحدة أو أكثر أن تعبر السطح وتنتقل إلى الفراغ: ثم هناك تطاير.

لنفترض أن جسيمًا كتلته M1 يتحرك بسرعة V1.0 ، ويصطدم بجسيم M2 في حالة السكون (V2.0 = 0). وفقًا للشكل 5.2 ، بعد الاصطدام ، يكتسب الجسيم ذو الكتلة M1 سرعة $V_{1;f}$ و f والجسيم الذي كتلته M2 يكسب سرعة $V_{2;f}$



الشكل 5.2: تصادم مرن بين جسيمين في النظام

7.2.الاصطدامات الالكترونية

هم الأهم في بداية رحلة الأيون عبر المادة(الشكلان 6.2 و7.2). في حالة حدوث تصادم إلكتروني ، يحدث فقدان الطاقة حيث تفاعل مع إلكترونات الذرات المستهدفة ويؤدي إلى تباطؤ الأيونات.

خلال هذا النوع من الصدمة ، يتبدد جزء من الطاقة و بالتالي لا يوجد أي حفظ للطاقة الحركية الكلية للنظام : ثم نتحدث عن تصادم غير مرن اعتمادا على سعة الأيون ، يمكنه التقاط الالكترونات أو التخلي عنها .

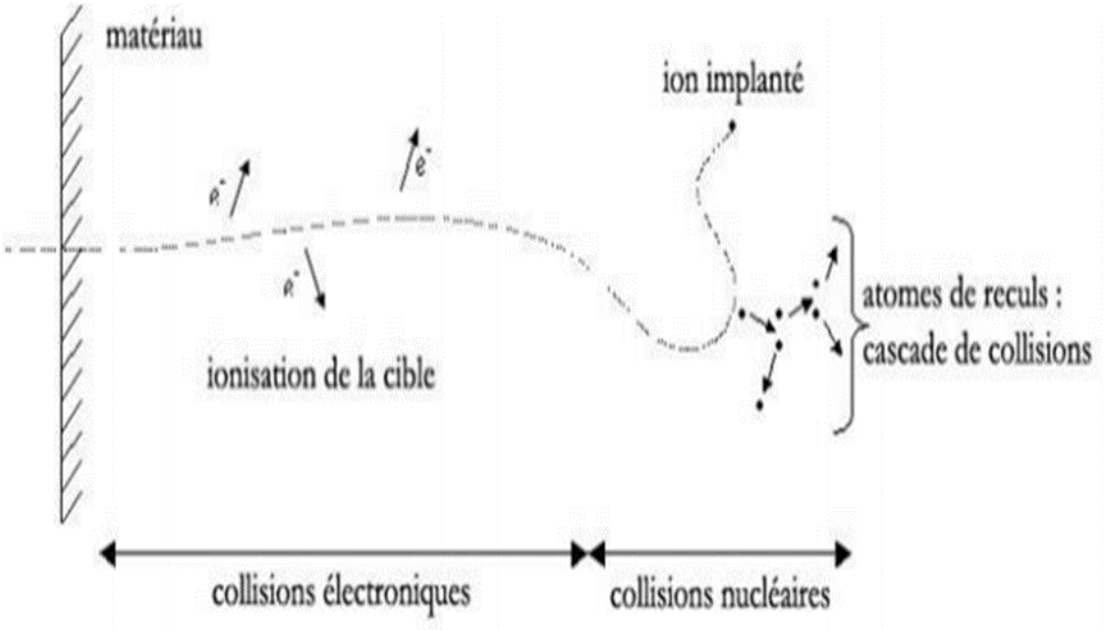
عندما يتم إخراج إلكترون من السحابة الإلكترونية للذرة بعد التفاعل الإلكترون ، تتأين الذرة. إنه يتبع إزالة الإثارة التي يمكن أن تكون سريعة أو أقل. في الحالة التي يكون فيها الأخير بطيئًا نسبيًا (<< 10−13 ثانية) على

سبيل المثال في العوازل حيث تكون حركة الإلكترون منخفضة ، يمكن إخراج الذرة المتأينة من موقعها إذا كانت الزيادة في الطاقة نتيجة لاستثارة .(Cazaux 1995a ، 1995b) اكتساب الطاقة بسبب إثارة الذرة هو كافٍ الذرة كافية وبالتالي يتم إنشاء زوج فرنكل بعد التأين ، ثم نتحدث عن الإشعاع الكيميائي. تنشط هذه العملية في العوازل لأن متوسط الطاقة لأزواج ثقب الإلكترون غالبًا ما يكون أكبر من طاقة الربط. ينتج عن هذا إمكانية إنشاء عيوب إلكترونية مستقرة

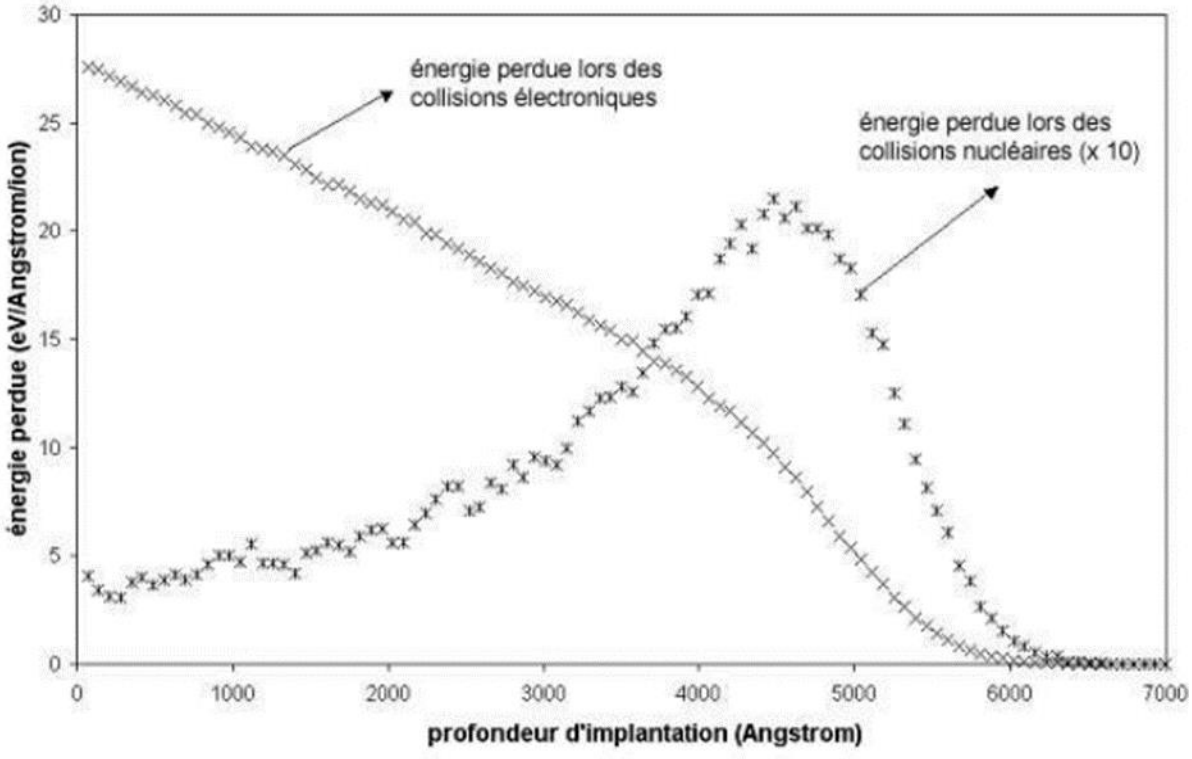
إن إزالة الإثارة التي تنطوي على إلكترونات أوجيه متكررة جدًا(Cazaux 1995a 1995b 1996 1999)

في العوازل، بعد سلسة أوجيه ، ظهور ثقوب ، يمكن أن يؤدي نطاق التكافؤ محليًا إلى ظهور شحنة موجبة هي آلية معقدة بين الذرات. يتم إزالة Knotek–Feibelman (1978) في بلورات أيونية أكثر أو أقل. آلية إذا كانت .X إلى الذرة Y عن طريق الانتقال بين الذرات مع نقل الإلكترون من نطاق التكافؤ للذرة X إثارة الذرة ، + O مثل) موجب Y ، يمكن أن يؤدي ذلك إلى ظهور أيون (−O2 على سبيل المثال) أنيون Y كاتيون و X المشحونة + Y ثم تحدث تنافرات كهروستاتيكية قوية جدًا بين الكاتيونات الموجودة في المادة وأيونات .(+ O2 –Knotek" بشكل غير طبيعي ، مما يؤدي إلى إخراج الأخيرة من موقعها. يعتمد هذا التفسير لآلية على نماذج طورها فلايشر وآخرون. (1965 ، 1967). لذلك يترك الجسيم الساقط عددًا كبيرًا "Feibelman .من أزواج فرنكل خلفه

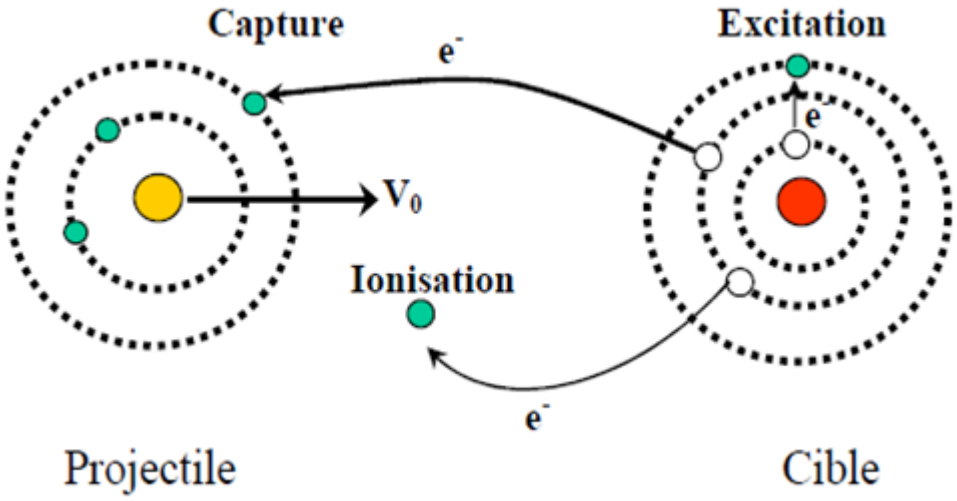
يؤدي التفاعل بين أيونات الحادث والمواد إلى إزاحة العديد من الأيونات من الذرات وظهور عدد كبير من عيوب فرنكل. يؤدي هذا إلى زيادة الانتشار حتى في درجات الحرارة المنخفضة (Zinckle 1997، 1999). أثناء التشعيع الأيوني في البلورات الأيونية العازلة ، قد يظهر مجال كهربائي يمكن أن يزيد من انتشار ذرات معينة .(Cazaux 1995b)



الشكل 6.2: التطور التخطيطي لأيون في المادة الصلبة. يفقد الأيون طاقته تدريجيًا من خلال سلسلة من الاصطدامات الإلكترونية والنووية حتى يتم زرعه.



الشكل 7.2: تطور الطاقة التي يفقدها أيون أثناء الاصطدام الإلكتروني والنووي كدالة لعمق الاختراق.



الشكل 8.2 : عمليات غير مرنة أثناء التفاعل لقذيفة مشحونة –نرة.

8.2.التفاعل الأيوني الصلب

كل جسيم مشحون يخترق مادة صلبة ، سيفقد طاقته من خلال أنواع مختلفة من التفاعلات على مستوى الهيكل لكي "يتوقف أخيرًا عند عمق معين" أو "يرتد" إلى السطح عن طريق التشتت الخلفي ، أو حتى "ينتقل" عندما تكون طاقته أكبر من أو يساوي ذلك المقابل للحركة الخارجية للهدف. وبالتالي ، فإن فقدان الطاقة يفسر نوع عملية التفاعل ، المرنة عن طريق الاصطدام النووي ، وغير المرنة عن طريق الاصطدام الإلكتروني ، والتي يتم تشغيلها بين الجسيم الساقط وجميع ذرات المادة المزروعة المعنية .

يُفترض دائمًا أن هذه التفاعلات تحدث بشكل فردي عن طريق الاصطدامات الثنائية ، ويمكن اعتبار الأخير بمثابة تقريب جيد لتبسيط دراسة التفاعل وفي نفس الوقت للعثور على التعبير عن إجمالي فقد الطاقة. إن معرفة كمية الطاقة التي يفقدها الأيونات أثناء تباطؤه في المادة الصلبة مهمة جدًا لفهم حالة المقذوفات المنشطة تمامًا ، في نهاية حالة المادة المكثفة تحت التشعيع .

9.2.تباطىء و توقف الأيونات في الهدف

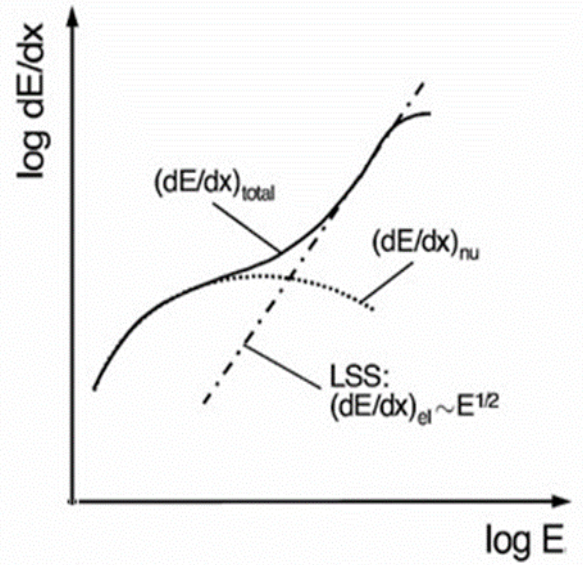
اعتمادًا على نطاق الطاقة المستخدم والكتلة الذرية للأيون ، تصبح إحدى العمليتين مهيمنة على الأخرى. يعطي تراكب العمليتين خسارة الطاقة الكلية للأيون في العمق. يصف التعبير التالي هذا التراكب ويعطي فقد الطاقة لكل وحدة مسافة:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right) = \left(\frac{dE}{dx}\right)_n + \left(\frac{dE}{dx}\right)_e \qquad (1.2)$$

في هذا التعبير ، يشير المصطلح n (dE / dx) إلى فقد الطاقة بسبب الاصطدام النووي بينما يشير (dE / dx) e إلى فقد الطاقة بسبب الاصطدام الإلكتروني. يمكن تعريف هذا المفهوم من خلال إعادة تفاعل الجسيم مع أحد المكونات الأولية للهدف مثل ذراته. ثم نحدد المقطع العرضي للتوقف:

$$S(E) = \frac{1}{N}\left(\frac{dE}{dx}\right) = S_n(E) + S_e(E) \qquad (2.2)$$

S هو المقطع العرضي للإبطاء ، أو قوة الإيقاف الذرية ، ويتم تعريفه على أنه يتناسب طرديًا مع فقدان الطاقة للأيون المرتبط بالمسافة المقطوعة ، dE/dx.أيSn هي قوة الإيقاف النووي، وSe هي قوة الإيقاف الإلكترونية، وN هو التركيز الذري للمادة المزروعة.



الشكل 9.2: توضيح مكونات قوة التوقف (النووية، الالكترونية و الكلية) بدلالة طاقة الأيون الوارد

10.2.قدرة التوقف النووي

يمكن التعبير عن التباطؤ النووي الناتج عن تصادم الايونات الواردة بأنوية الهدف بواسطة قدرة التوقف النووي و التي يمكن تعريفها بالعلاقة التالية :

$$S_n(E) = \frac{1}{N}\left(\frac{dE}{dx}\right)_n = \int T(p)\, d\,\sigma \qquad (3.2)$$

T : الطاقة المحولة إلى ذرة الهدف عن طريق الأيون الوارد.

dσ: المقطع التفاضلي الفعال (احتمال أن تمنح القذيفة طاقتها للجسيم الهدف عند عملية التصادم).

11.2.قدرة التوقف الالكتروني

يعبر عن التباطؤ الالكتروني الناتج عن التصادمات الالكترونية بين الايونات الواردة و الالكترونات المرتبطة بأنوية الذرات بواسطة قدرة التوقف الالكتروني و التي تكون جد مهمة في مجال الطاقات العالية. فحسب نموذج LSS في مجال الزرع الأيوني، تكون قدرة التوقف الالكتروني متناسبة مع سرعة الايون الوارد و تكتب على النحو التالي:

$$S_e = 8\pi e^2 a_0 \frac{Z_1^{7/6} Z_2}{\left(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}\right)^{3/2}} \frac{V}{V_0} D \qquad (4.2)$$

كذلك توجد علاقة أخرى من الشكل:

$$S_e = KE^2 \qquad (5.2)$$

D : الكثافة الالكترونية للهدف.

V, a_0: سرعة و نصف قطر بوهر على التوالي.

V, E: سرعة و طاقة الأيون على التوالي.

K : ثابت، قيمته النظرية تم حسابها من قبل Lindhard et all

12.2.البرامج المستعملة لمحاكاة ظاهرة الزرع الأيوني

لقد تم تطوير، منذ 1960، طرق للمحاكات الحاسوبية من أجل حساب مسارات الأيونات في المواد الصلبة. حيث كانت الفكرة الأساسية فيها هي إتباع حركة الأيونات في الوسط عن طريق محاكاة التصادمات مع نواة الهدف. عادة، تأخذ في الحسبان قدرة التوقف الالكتروني بوصفها قوة احتكاك لإبطاء الأيون.

تستند الطرق التقليدية المستخدمة في المحاكاة الحاسوبية للذراة الطاقية مع الأهداف الصلبة إلى تقريب التصادمات الثنائية **BCA** (Binary Collision Approximation). في هذه الطرق يتم التعامل مع حركة الأيونات في

العينة المزروعة بإعتبارها سلسلة من التصادمات الفردية بين الأيونات و ذرات الهدف. من بين البرامج التي استعملت في هذا العمل هما برنامجي SRIM و CRYSTAL−TRIM، اللذان يستخدمان طريقة تقريب التصادمات الثنائية.

1.12.2.برنامج SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter)

SRIM، معناه إيقاف ومدى الأيونات في المادة،هوعبارة عن مجموعة من البرامج أجهزة

كمبيوتر تحاكي تفاعل الأيونات العرضية مع المادة.

يتم التعامل مع تصادمات الأيونات/الذرات بواسطة ميكانيكا الكم. معرفة كيفية ايقاف وتوزيع الأيونات ، كما يمكنه حساب الأيونات الموجودة في المادة الصلبة، من حيث المبدأ، في نطاق الطاقة −10eV 2 GeV/uma. تم تطوير البرامج بواسطة James F. Ziegler et Jochen P. Biersack في الثمانينات ، ومنذ طرحه عام 1985، أدخلت عليه عدة تحسينات وتصحيحات يتم اجراؤها كل ست سنوات على أساس بيانات تجريبية جديدة.

حاليًا، يتم إجراء أكثر من 700 استشهاد علمي فيما يتعلق بـ SRIM كل عام. يتيح البرنامج الحساب السريع للتخطيط والرش. المعلومات التي يمكن الوصول إليها هي الملف التعريفي للزرع الأيوني الحادث، والعائد رش الأنواع الكيميائية المختلفة وتبادل الطاقة عن طريق الصدمة النووية وعن طريق التشتت الغير المرن .

SRIM عبارة عن مجموعة من البرامج التي تحسب توقف ومدى الأيونات (حتى2 GeV/ amu) في المادة باستخدام المعالجة الكمومية لتصادمات الذرات الأيونية. للأيون تفاعلات طويلة المدى تخلق إثارة إلكترونية في الهدف. ويتم وصفها من خلال تضمين وصف للهيكل الإلكتروني الجماعي للهدف والهيكل

الرابطة بين الذرية عند تكوين الحساب (جداول القيم الاسمية هو متاح) يتم وصف حالة الأيون في هدف الشحن باستخدام مفهوم الشحن الفعالة والتي تتضمن حالة شحن تعتمد على السرعة و فحص بعيد المدى بسبب البحر الإلكتروني الجماعي للهدف.

يمكن العثور على وصف كامل للحساب في كتاب – SRIM التوقف ونطاق الأيونات في المواد الصلبة ، ، بقلم Ziegler, Biersack et Littmark في عام 1985 (صدرت طبعة جديدة نشرت عام 2009) .يعرض هذا الكتاب فيزياء اختراق الايونات في المواد الصلبة بطريقة تعليمية بسيطة ، ثم يعرض منحنى المصدر لبرامج SRIM مع شرح كامل للفيزياء .

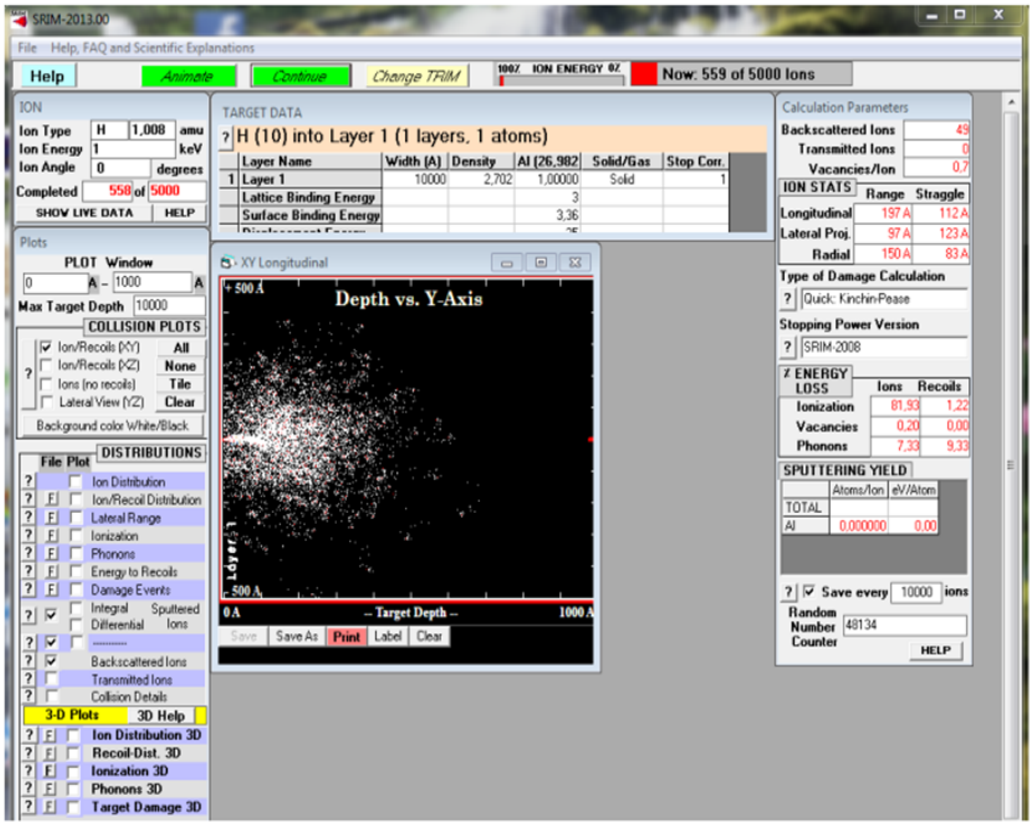
تحلل الفصول الأخرى جودة SRIM و عرض التطبيقات المختلفة. تتوفر على هذا الموقع رسوم بيانية توضح قوى إيقاف SRIM وجميع البيانات التجريبية المتاحة لأيونات H و Heفي جميع الأهداف.

يعد TRIM (نقل الأيونات في المادة) هو البرنامج الأكثر شمولاً المتضمن. TRIM

يستقبل الأهداف المركبة المعقدة التي يصل عددها إلى ثماني طبقات، كل منها من مواد مختلفة. سيتم حساب كل من التوزيع النهائي ثلاثي الأبعاد للأيونات وأيضًا جميع الظواهر المرتبطة بفقدان الطاقة الحركية للأيون: تلف الهدف، والخرق، والتأين، وإنتاج الفونون. يتم تعقب جميع مجموعات الذرات من الهدف إلى الهدف بالتفصيل. تم تصميم البرامج بحيث يمكن مقاطعتها في أي وقت ثم استئنافها لاحقًا (نقل الأيونات في المادة) .بإجراء

TRIM سيسمح لنا برنامج محاكاة التشتت في الهدف ولهذا سنقوم بمحاكاة عدد كبير من المقذوفات التي

تدخل الهدف. يوضح الشكل 10.2 مثالاً لمحاكاة تفاعلات الجسيم في الهدف (Al) بواسطة TRIM جسيمًا تلو الآخر .



الشكل 10.2 : محاكاة بواسطة برنامج TRIM

2.12.2.مبدأ التشغيل

إجراء عمليات المحاكاة بطريقة مونت كارلو ضمن حدود التداخلات الثنائيات29 في هدف غير متبلور يمكن للمستخدمين تعيين معلمات الهدف الأولية (المادة، التركيب، الكثافة) و الأيونات الأولية (الطبيعة و الطاقة و وزاوية السقوط). اختيار عدد الجسيمات الواقعة تتيح تحديد الجودة الإحصائية للمحاكاة . اما بالنسبة فهي كأي محاكاة فان الزيادة في الأخير يؤدي إلى الزيادة في وقت الحساب .

يتم التعامل مع جميع التصادمات على أنها أنظمة ذات جسمين (BCA أي ما يسمى بالتقريب الإصدام الثنائي) ؛ أي أن الصدمات المختلفة ليست مترابطة مع بعضها البعض . بعد الإصدام يمكن للذرات أن تخضع لمزيد من

من الاصطدامات. هذا النموذج يفترض ضمنيا عدم إعطاء أي طاقة للإكترونات و بصورة أعم يتجاهل كل التشتت غير المرن .

يعتمد حساب SRIM على عدة افتراضات مبسطة. أولا، المادة تعتبر غير متبلورة ، حتى لو كان متوسط المسافة بين الذرات يتوافق مع المسافة الذرية للمادة البلورية . وبالتالي فإن SRIM غير قادر على أن يأخذ بعين الاعتبار أي تأثير توجيه ، مما يقلل من الاحتمال بمقدار درجتين من احتمالية حدوث تصادمات ذرية .

علاوة على ذلك، تعتبر الذرات الثابتة (المادة عند k 0) مما يضع جانبا ظاهرة اعادة التجميع بين ، على سبيل المثال ذرة نازحة و شغور . و لذلك يجب أن ينظر الى المعدل المحسوب على أنه حد من الأضرار المحتملة الناجمة عن شعاع التحليل. ومع ذلك أظهرت الدراسات المبنية على حسابات SRIM وجود ارتباطات جيدة بين إنتاجية الاختراق المحسوب و تلم المقاسة و كذلك التوزيع الزاوي للذرات رش.

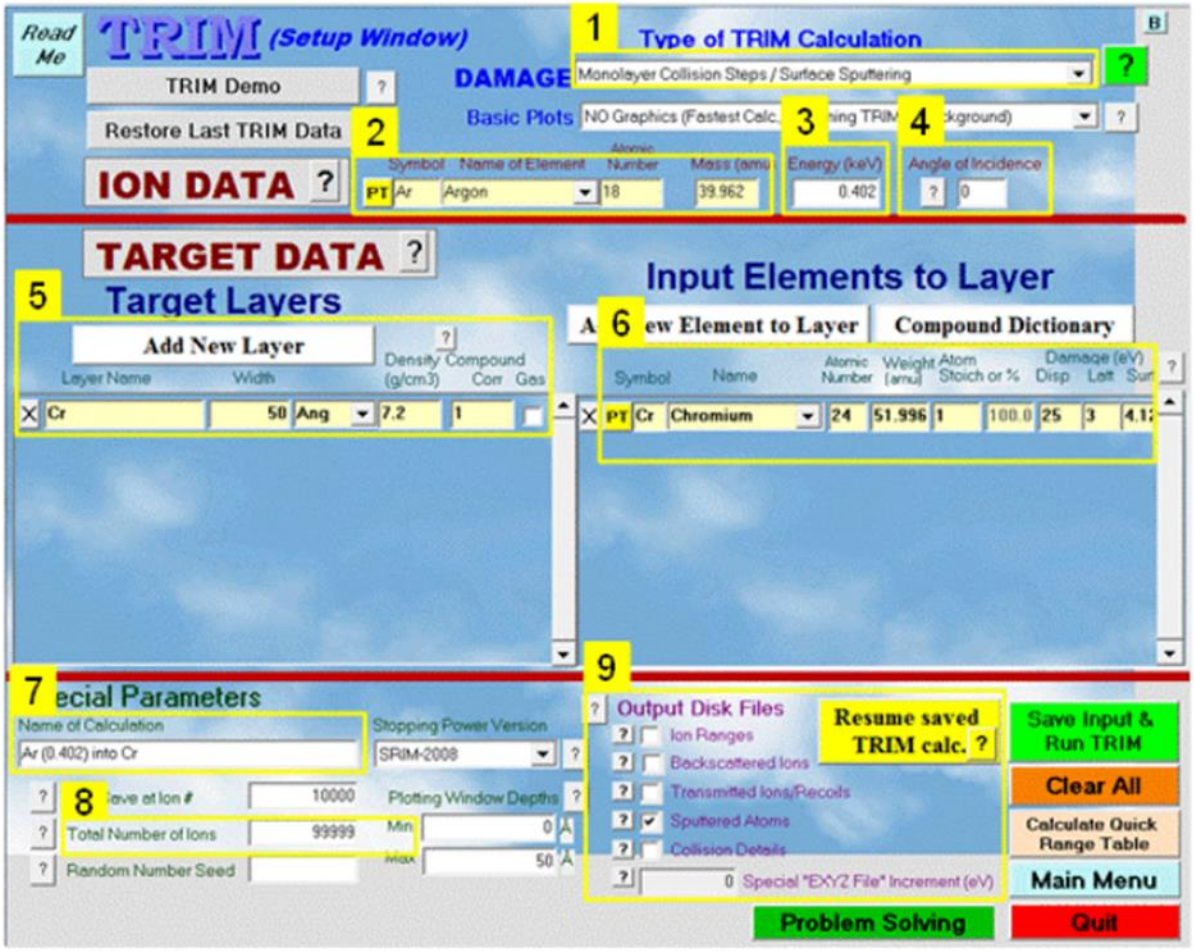
بشكل عام، يؤدي أداءً جيدًا عندما يتعلق الأمر بدراسة التأثير النسبي لـ a الكمية التجريبية على النظام

في حالة دراستنا، استخدمنا برنامج(TRansport des Ions dans la Matière) TRIM

اصدار SRIM-2008 .

3.12.2.الدخول و الخروج منSRIM

يوضح الشكل 11.2 واجهة برنامج SRIM الإصدار 2008 مع الخيارات و المعلمات المختلفة التي سيتم تقديمها للحساب .



الشكل 11.2: واجهة البرنامج SRIM-2008.

تحتوي واجهة برنامج TRIM على عدة خيارات. الخيارات من 1 إلى 9 تسمح لك بذلك

اختر اعدادات الإدخال والإخراج المدرجة في الجدول 1.2 إصدار(SRIM-2008) لكل خيار .

	الاعدادات	الخيار
يسمح باختيار الظواهر المراد دراستها من بين: –الضرر المستهدف وتوزيع الأيونات، –زرع الأيونات، –رش، – الطاقة/الزاوية/العمق النوعي للأيونات	المداخل	1
	بيانات الأيونات الحادثة: الاسم، الرمز، العدد الذري، الكتلة الذري	2
	طاقة الأيونات ب keV	3
	زاوية سقوط الأيونات بين درجة 0و°90	4
	طبيعة المادة المعرضة للقصف الأيوني	5
	الاسم والعدد الذري والكيمياء المتفاعلة للمادة المقذوفة و طاقة الرابطة للذرات	6
	اسم المحاكاة: الغاز (الطاقة ب KeV) – الهدف.	7

	عدد الأيونات المحقونة (الحد الأقصى يمكن أن يصل إلى 7+10 و تم ضبط القيمة الافتراضية على 716,381 أيونات)	8
Range.txt: جدول التوزيع النهائي للأيونات والذرات المستهدفة. Backscat.txt: حركية جميع الأيونات المتناثرة (الطاقة، الموقع والمسار). Transmit.txt: حركية جميع الأيونات المرسلة (الطاقة والموقع و طريق). Sputter.txt: حركية جميع الذرات المستهدفة عن طريق الاخرق الكاثود من الهدف. Collision.txt: جدول جميع تصادمات الأيونات/الأهداف الذرية	المخارج	9

جدول 1.2: يمثل اعدادات المداخل و المخارج ل TRIM

خاتمة جزئية:

في سياق هذا الفصل، قمنا بعرض نظرة عامة عن التفاعلات أيون–مادة أثناء استعمال تقنية الزرعالأيوني، بحيث عدة جوانب تطرقنا إليها مثل : لمحة عن العناصر الكيميائية المستعملة في هذا العمل، الخصائص المميزة لهذه التقنية، نظريات تباطؤ وتوقف الأيونات في المادة، توزيع الأيونات المزروعة، أثر الاستقناء على الأيونات المزروعة و توزيع العيوب في المادة بعد عملية الزرع.

بالإضافة إلى ذلك، أعطينا لمحة عن البرنامجين المستعملين في محاكاة عملية الزرع الأيوني و التنبؤ بالظواهر الفيزيائية الخاصة بتباطؤ و توقف الأيونات في المادة. الأول هو برنامج SRIM الذي يحاكي زرع الأيونات في هدف غير مبلور.

دراسة نتائج المحاكاة

الفصل الثالث

مقدمة

في سياق هذا الفصل سوف نقوم بمحاكاة زرع أيونات الكربون في مادة الهدف Siالسيليسيوم المدعمة بالأزوت بواسطة برنامج SRIM ، و هذا من أجل التنبؤ بأهم الظواهر الفيزيائية الخاصة بالتفاعل أيون–مادة. البرنامج الذي يحاكي تفاعل الايونات مع المادة غير المبلورة. هذا البرنامج سوف يساعداننا على التنبؤ بأهم الظواهر الفيزيائية الخاصة بتباطؤ و توقف الأيونات في المادة أثناء زرعها. كذلك سوف نقوم بتقدير معاملات الزرع الأيوني التي تعطي لنا نظرة عن توزيع الأيونات و العيوب داخل المادة. زيادة على ذلك سوف ندرس بشكل خاص، عبر هذا الفصل، تأثير طاقة الزرع والتركيب الكيميائي للفيلم المزروع على ملف غرس الكربون الناتج.

1.3.محاكاة التفاعل أيون-مادة و التنبؤ بالمعاملات الخاصة بالزرع الأيوني

1.1.3.استعمال برنامج SRIM

*** الشروط المستعملة في المحاكاة**

لتنفيذ برنامج المحاكاة، يجب على المستخدم إدخال مختلف المعطيات التي تجعله يدرس الحالة العامة للتفاعلات أيون–مادة. ومن الواضح أن اختيار هذه المعطيات أمر بالغ الأهمية بحيث يضعها الباحث في الشروط التي هي الأقرب إلى الحالة الحقيقية. لذلك عند استعمالنا برنامج SRIM في محاكاة تفاعل أيونات الكربون مع هدف من السليكون،البنية مكونة من عدة طبقات هي SiNx/SiO2/Si واختيار الطاقة المستخدمة في عملية الزرع. العناصر الموجودة في المحاكاة هي الكربون (C)، ومكونات الهدف التي نعرفها: السيليسيوم (Si)، والأزوت (N)، والأكسجين (O). اتخذنا الشروط التالية نستخدم مادة الآزوت بنسبة 3% و10% و16%. من أجل الكشف عن تأثير اضطراب شبكة السيليسيوم البلورية بسبب وجود الآزوت في الطبقة الأولى. فيما يتعلق بتوجيه الهدف بالنسبة لحزمة الأيونات، استخدمنا الحالة الأكثر شيوعا في زرع الأيونات وهي° 0 وأخيرا، لابد من الإشارة إلى أن برنامج SRIM يعتبر الهدف غير المبلور فقط.

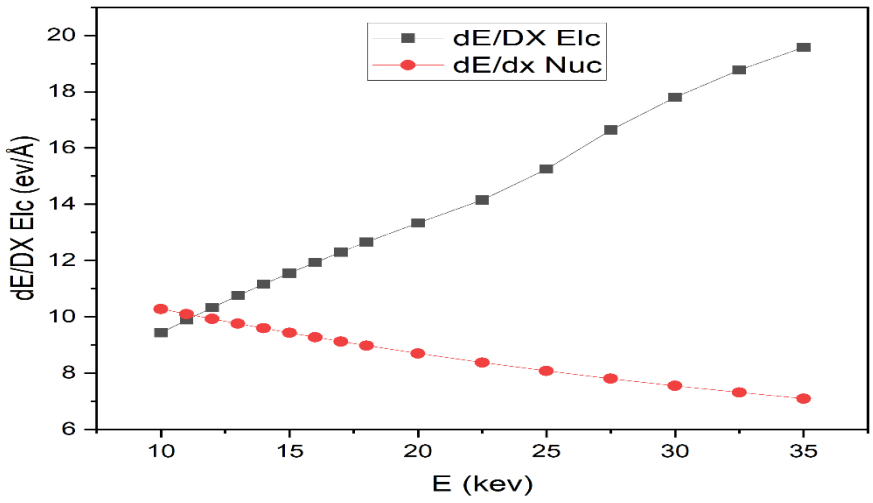
2.3.محاكاة القدرة على الإيقاف

تم تحقيق عمليات محاكاة قوى الإيقاف الإلكترونية والنووية، ومسحوق الطحن وكمية العناصر الافتراضية التي يتم إنشاؤها بناءً على عمق المادة (cible) باستخدام برنامج TRIM [1, 21]. يستخدم هذا البرنامج رمز TRIM استنادًا إلى طريقة حسابية من نوع **Monte–Carlo [22]**. يقوم برنامج TRIM بحساب مسارات الأيونات في المادة الصلبة. يتيح هذا البرنامج الحصول بسرعة عن عمق الأيونات المزروعة، ويتم محاكاة الإعدادات المخلقة تبعًا للطبيعة والطاقة وزاوية سقوط ذرة أيون وطبيعة السلك. . ونتيجة لذلك، يتم تنفيذه بناءً على التقريب الذي يوجد به التصادمات الثنائية الفريدة، فإن حادث الأيون لا يؤدي إلى اصطدام ذرة الأنبوب، كما أن الأصوات مهملة. تولد تلك النقاط الافتراضية، كل ذرة تصطدم بطاقة أعلى من طاقة الإزاحة التي تبتعد عن ذرة خلالية وتترك فجوة خلفها. من أجل متابعة رمز المحاكاة، يجب على المستخدم تقديم معلمات مختلفة. من الواضح أن اختيار هذه الإعدادات أمر بالغ الأهمية ويجب على الباحث أن يتكيف مع الظروف التي تقترب من الوضع الحقيقي. فيما يتعلق بما يهمنا، في وقت أولي، فإننا نفتقد في حالة عامة مخصصة لدراسة التفاعلات المادية. خلال المرحلة الثانية، يجب أن نأخذ في الاعتبار ما يتعلق بالظروف اللاحقة التي تم تضمينها: نحن نختار سلكًا من السيليسيوم (العمق 4000Å) على طبقة رقيقة من أكسيد SiO2 (درجة = 1000 Å). تم إدخال هذا الأكسجين لتمثيل أكسيد السيليسيوم الطبيعي على سطح Si. يعتمد تشابك الأكسجين وجودته على جودة ركيزة السيليسيوم وعلى وجه الخصوص على السطح، من خلال طلاء الجزء المجوف. يمنح السطح الخشن أكسيدًا بنفسجيًا عالي الجودة. هذا هو السبب في أن عملية التنظيف ليست نهائية قبل الأكسدة لضمان سطح خاص وخفيف[23]. عدد الأيونات المستخدمة هو 10000. ومع ذلك، فإن القيمة المقترحة، افتراضيًا، حسب البرنامج هي 99999.

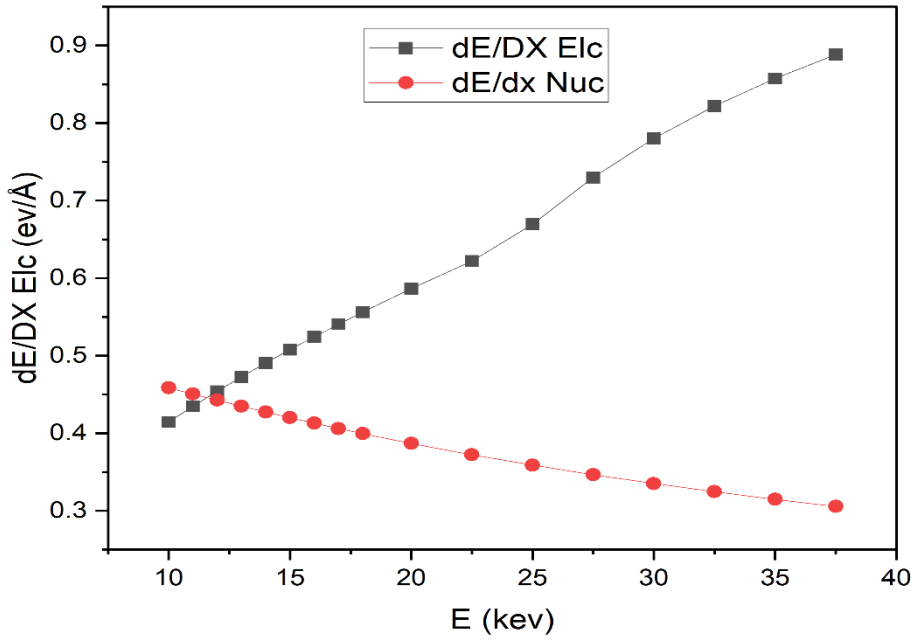
1.2.3.القدرة على إيقاف الكربون في البنية SiNx/SiO2/Si

في عملية الزرع الأيوني، من الضروري دراسة قدرة إيقاف أي جسيم يتم استخدامه في أي هيكل مادي. كما تم ذكره في الفصل السابق، تمثل هذه القدرة الفقد في الطاقة بسبب التفاعلات المختلفة التي تحدث أثناء التعرض للشعاع. يمكن أن تكون هذه التفاعلات نووية وتحدث مع أنوية المادة، أو إلكترونية نتيجة مساهمة الإلكترونات في ذرة الهدف. في حالتنا، سنقتصر على دراسة نطاق ضيق من الطاقة حيث تكون أقل نسبيًا بالمقارنة مع مجموعة واسعة من الطاقات المستخدمة في الزرع الأيوني. يتراوح هذا النطاق بين 5 و 25 كيلو إلكترون فولت، حيث يتم حساب فقدان الطاقة بالنسبة لوحدة الطول (أنجستروم).

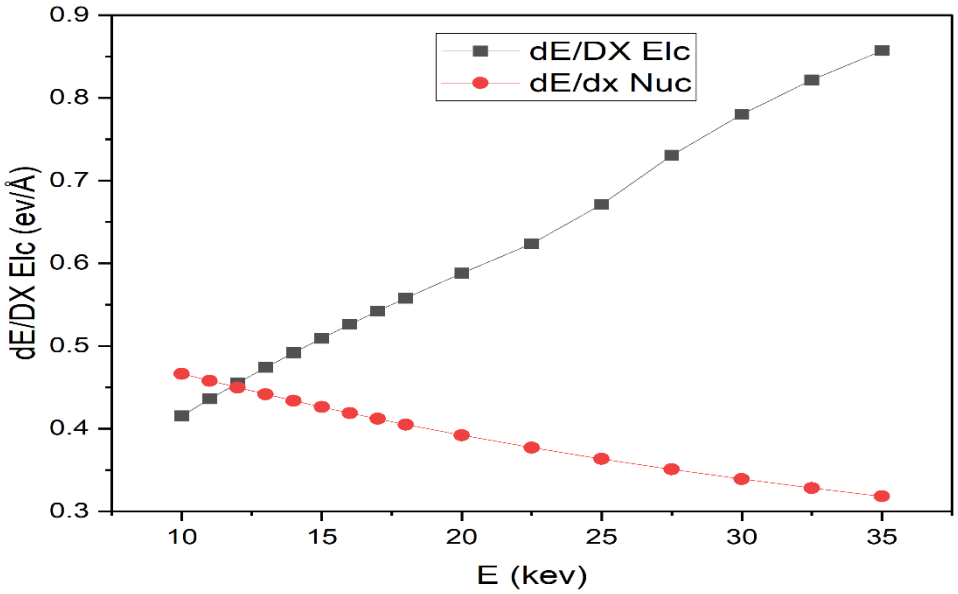
الأشكال من 3.1 إلى 3.4 نتائج المحاكاة من خلال الكود TRIM فيما يتعلق بقدرات إيقاف الكربون في السيليسيوم المغطى **بالآزوت** بناءً على طاقة الزرع لكميات مختلفة من الآزوت في السيليسيوم



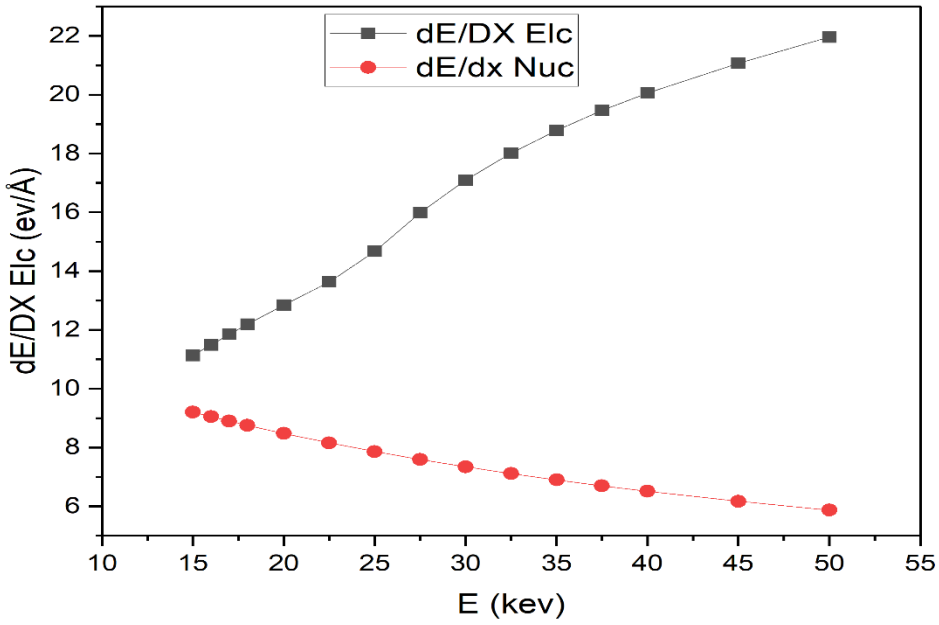
الشكل 3.1: محاكاة قوى الإيقاف النووية والإلكترونية للكربون في الهدف $SiN_{0.03}/SiO_2/Si$ اعتمادًا على الطاقة الواردة للأيونات



الشكل 3.2: محاكاة قوى الإيقاف النووية والإلكترونية للكربون في الهدف SiN0.1/SiO2/Si اعتمادًا على الطاقة الواردة للأيونات



الشكل 3.3: محاكاة قوى الإيقاف النووية والإلكترونية للكربون في الهدف SiN0.16/SiO2/Si اعتمادا على الطاقة الواردة للأيونات



الشكل 3.4: محاكاة قوى الإيقاف النووية والإلكترونية للكربون في الهدف SiN0.1/SiO2/Si اعتمادًا على الطاقة الواردة للأيونات

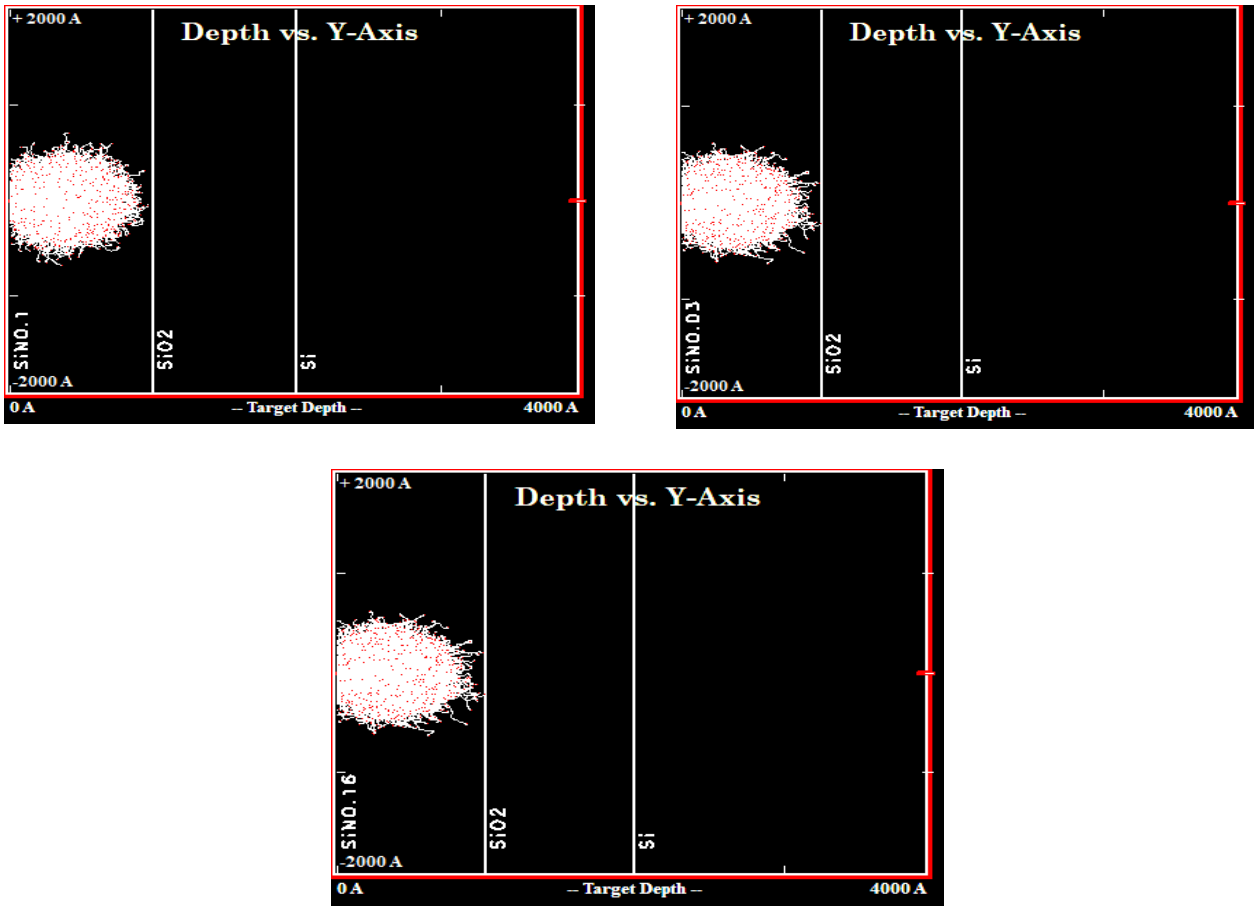
نلاحظ بوضوح أن كلا النوعين من قوى الإيقاف يعتمدان على طاقة الزرع. وبالفعل فإن قوة الإيقاف النووي تتناقص مع زيادة الطاقة، في حين أن قوة الإيقاف الإلكتروني تزداد مع زيادة طاقة الانغراس. وفي كلتا الحالتين فإن العلاقة التي تعبر عن تطور الخسائر تتناسب مع طبيعة وعدد الاصطدامات التي تحدث أثناء زرع الكربون .ونظرًا لأن أيونات الكربون خفيفة (كتلة ذرية منخفضة)، فإن العملية التي تولد الخسائر النووية تكون منخفضة. علاوة على ذلك، من خلال زيادة طاقة الزرع، تنخفض الخسائر النووية. ومع ذلك،

فإن عددًا كبيرًا من تصادمات الإلكترونات تعمل على تعديل الطاقة الداخلية للذرات المستهدفة بشكل كبير. وينتج هذا التعديل عن إثارة عدد كبير من الإلكترونات مما يؤدي إلى زيادة الفاقد الإلكتروني.

ومن ناحية أخرى نلاحظ أن كلا من قوى الإيقاف تزداد مع زيادة كمية النيتروجين في أفلام السيليسيوم. ويمكن تفسير هذه النتيجة بحقيقة أن ذرات النيتروجين تتصرف في الهدف كعائق أمام اختراق الكربون.

3.3.مسار الأيونات المزروعة في البنية

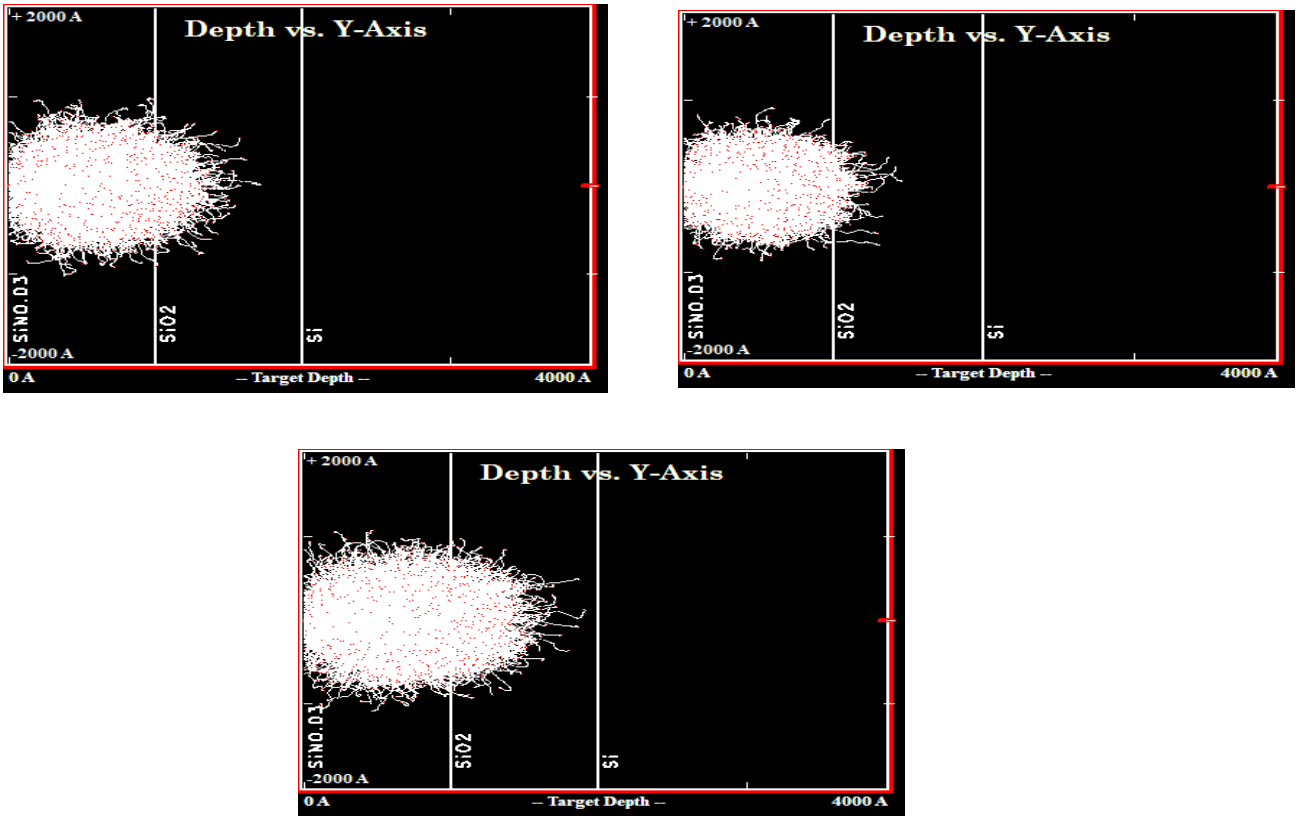
نظرًا لصعوبة تحديد مسار كل أيون من الكربون أثناء حركة الغرس الأيوني، تسمح حسابات مونتي كارلو بالتنبؤ بالمخطط التالي لكل أيون، وأخيرًا التوزيع المكاني لجميع الأيونات الموضعية في بناء. يوضح الشكل 3.5 مسارات الأيونات التجويفية في البنية SiNx/SiO2/Si باستخدام مادة الكيمياء x من الهدف.



الشكل 5.3 : محاكاة مسار التجويف في الهيكل SiNx/SiO2/Si، لنسب الآزوت 3%، 10%، و16%، مع طاقة 10 KeV

يبدو أن الأيونات المزروعة تتركز أساسا في منطقة قريبة من سطح الطبقة الرقيقة ، بعمق يصل (400 nm) . بغض النظر عن كمية النيتروجين الموجودة في الأفلام ، لا تصل إلى الطبقة الأكسيدية المدمجة. من الجدير

بالذكر أن شكل المنطقة التي تحتوي على أيونات الكربون يبقى ثابتًا لثلاث حالات مختلفة المحقونة بالنيتروجين، ولكن العمق الذي تخترقه الأيونات يبدأ في الانخفاض مع زيادة تركيز الشوائب من النيتروجين في الهيكل .



الشكل 6.3: محاكاة مسار التجويف في الهيكل SiN0.03/SiO2/Si لطاقات مختلفة

E=15 KeV ; E=18 KeV ; E=21 KeV :

في الشكل 6.3 ، يبين لنا نتائج المحاكاة النسبية لتنوع المسارات بناءا على طاقة الزرع بحيث كانت نسبة الأزوت 10% . نلاحظ أن الأيونات المزروعة تكرن متمركزة دائما في المنطقة القريبة من السطح لمجموعة من الطاقة

المختارة ، كما نلاحظ زيادة عمق الاختراق كلما زادت طاقة الزرع . ونتيجة لذلك فان زيادة 5KeV في قيمة طاقة الزرع تؤثر بشكل كبير على قدرة أيونات التجويف المزروع .

قد لاحظنا أن محاكاة المسارات للا تتوصل الى طريقة فعالة في توزيع الجزيئات المزروعة في الأعماق.

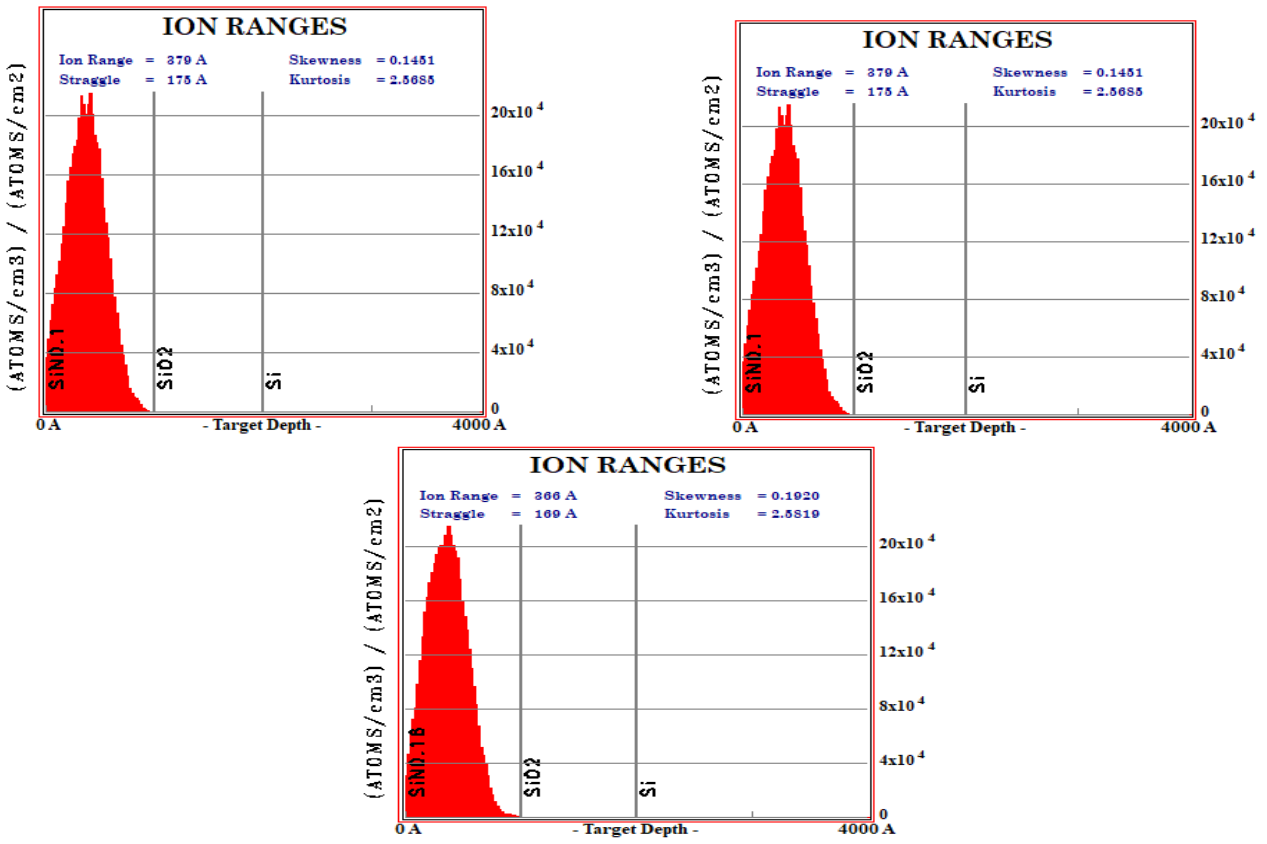
4.3.محاكاة بعض الظواهر الفيزيائية الخاصة بالتفاعل أيون-مادة

كما ذكرنا سابقا، خلال زرع الأيونات، يتم إنشاء العديد من الآثار الثانوية في الهدف. هذه الآثار تسمى بالاضطرابات وهي تتلخص في : تشكيل الفجوات، ظاهرة التأين، إنتاج الفونونات....الخ.

1.4.3.تأثير كمية الآزوت في الطبقة SiNx

تلعب كيمة النيتروجين الموجودة في الطبقة دورًا مهمًا في تأثيرمحاكاة ملفات تركيز الكربون في الطبقة المزروعة. في الواقع، يسمح هذا التحكم بين الآخرين، بضبط المكاسب في مجرى الترانزستورات ثنائية القطب وتوترات متابعة الترانزستورات MOS (أشباه الموصلات المعدنية للأكسيد) أثناء مراحل تصنيع الدوائر المتكاملة. علاوة على ذلك، من الممكن تحديد الإعدادات التي تنبثق عن التوزيع، خاصة في اللحظتين الأوليين من الفيزياء. يعرض الشكل 7.3 ملفات تعريف تركيز الكربون التي تم الحصول عليها من خلال المحاكاة ، من الواضح أن التحكم في تركيز الكربون في الطبقة المزروعة يلعب دورًا حيويًا في تصنيع الدوائر

المتكاملة ويمكن استخدام المحاكاة لفهم وتحليل هذا التأثير وضبطه بشكل دقيق لضمان أداء وجودة أفضل للأجهزة الإلكترونية.



الشكل 7.3 :محاكاة الكربون في الهيكل SiNx/SiO2/Si لنسب SiNx/SiO2/Si3 %، لنسبة 3% ، 10%، و16%، من الأزوت مع طاقة 15keV وجرعة $10^{15}/cm^2$

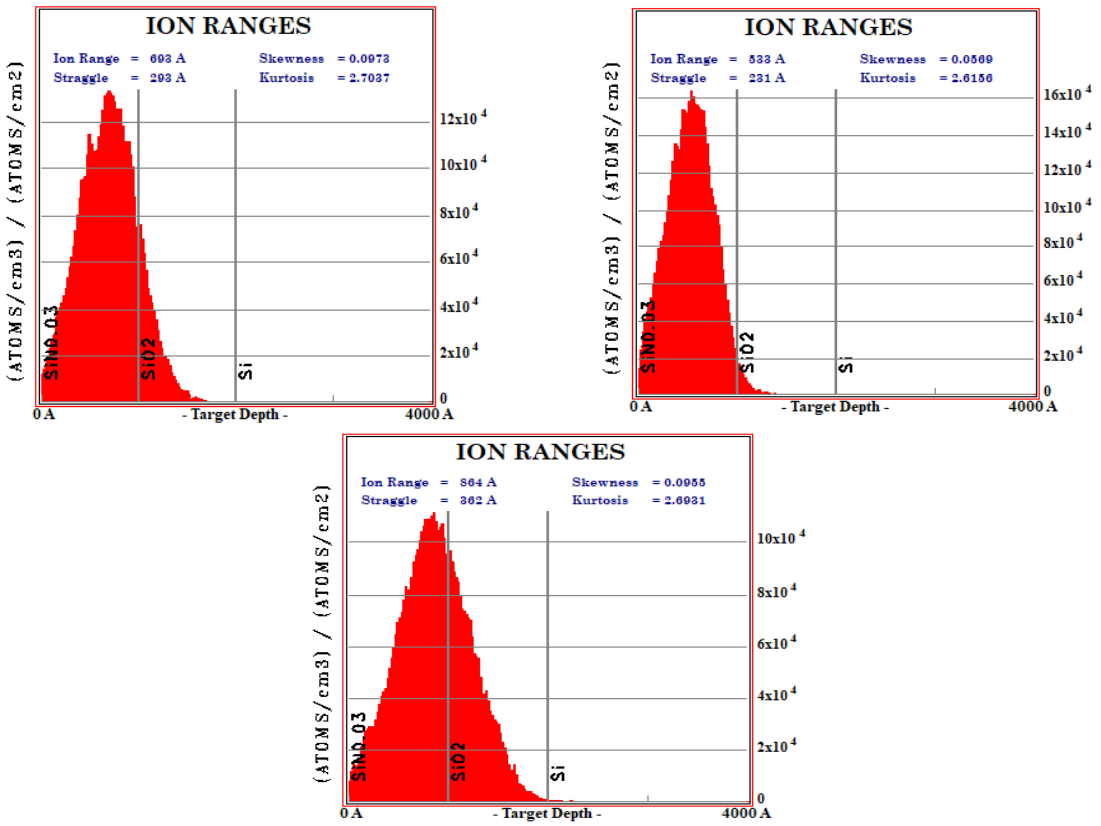
نلاحظ أن ملف Gaussien يبدأ بمستوى معين من التركيز الكيمياء الحيوية التي تم أخذها بعين الاعتبار.

هذا التركيز يظهر وجود ذرات الكربون على سطح الطبقة المزروعة بعد التطعيم . تزداد تركيز الشوائب تدريجيا

حتى يصل الى العمق المتوسط للاختراق حيث يصبح أقصى قيمة .من هناك، نرى انخفاضا تدريجيا (في قيمة الغاوسية) في تركيز المشوب المزروع .

2.4.3.تأثير طاقة الزرع

تأثير الطاقة المزروعة على اختراق الكربون ، تم ملاحظة ذلك بوضوح من خلال نتائج محاكاة المسارات. هذا التأثير يجب أن يكون أكثر وضوحًا في ملفات التركيز. يعرض الشكل8.3ملفات تعريف تركيز الكربون التي تم الحصول عليها من خلال المحاكاة.



الشكل 8.3 : محاكاة ملفات تعريف توزيع الكربون في البنية SiN0.03/SiO2/Si، حسب طاقة الزرع E=15 KeV ;E=20KeV ;E=25KeV

تقدم الملفات الشخصية الثلاثة شكلاً غاوسيًا. لدينا ملاحظات حول كل ملف تعريف يبدأ من قيمة معينة للتركيز تميل إلى الانخفاض مع زيادة طاقة الزرع.

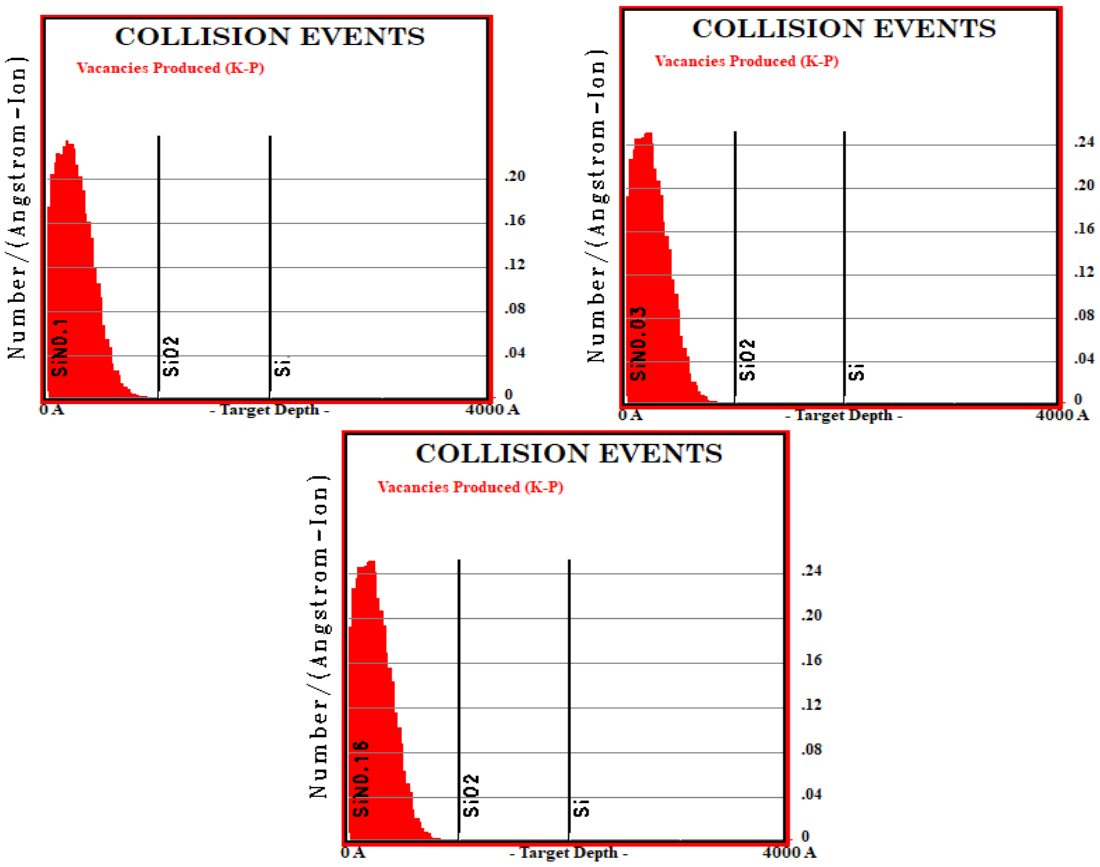
5.3.إنتاج الثغرات

قد يتم تمييز إنتاج الثغرات عن طريق الزرع الأيوني من خلال توزيع هذه الثغرات في الهيكل. الشكلان 9.3 و 10.3يصفان الظاهرة على أساس عدد الثغرات الناتجة بوحدة أنجستروم . عندما يتم نقل الطاقة إلى الذرة (بواسطة أيونات الكربون) التي تكون أعلى من الطاقة التي يتم إزاحتها مرة أخرى، ويتم إخراج ذرة السيليسيوم من مكانها ولا تعود على الفور . بالإضافة إلى ذلك، عندما تكون الطاقة المنقولة إلى هذه الذرة كبيرة بما فيه الكفاية، يمكن للذرة المستهدفة أن يحل محل ذرات أخرى منها تعرف بذرات الاندفاع .

- تغيير في كمية الآزوت في الطبقة

يمكن تقريب التوزيعات التي يتم الحصول عليها من خلال حشوات مركزية في عمق RL يتوافق مع الكثافة القصوى للثغرات. في جميع النقاط، يتناسب عدد الثغرات المنتجة بشكل مباشر مع عدد الاصطدامات النووية

التي تحدث في العمق. يمكن أيضا ملاحظة أن العدد الأقصى من الثغرات يزيد حسب زيادة مادة الآزوت في الطبقة.

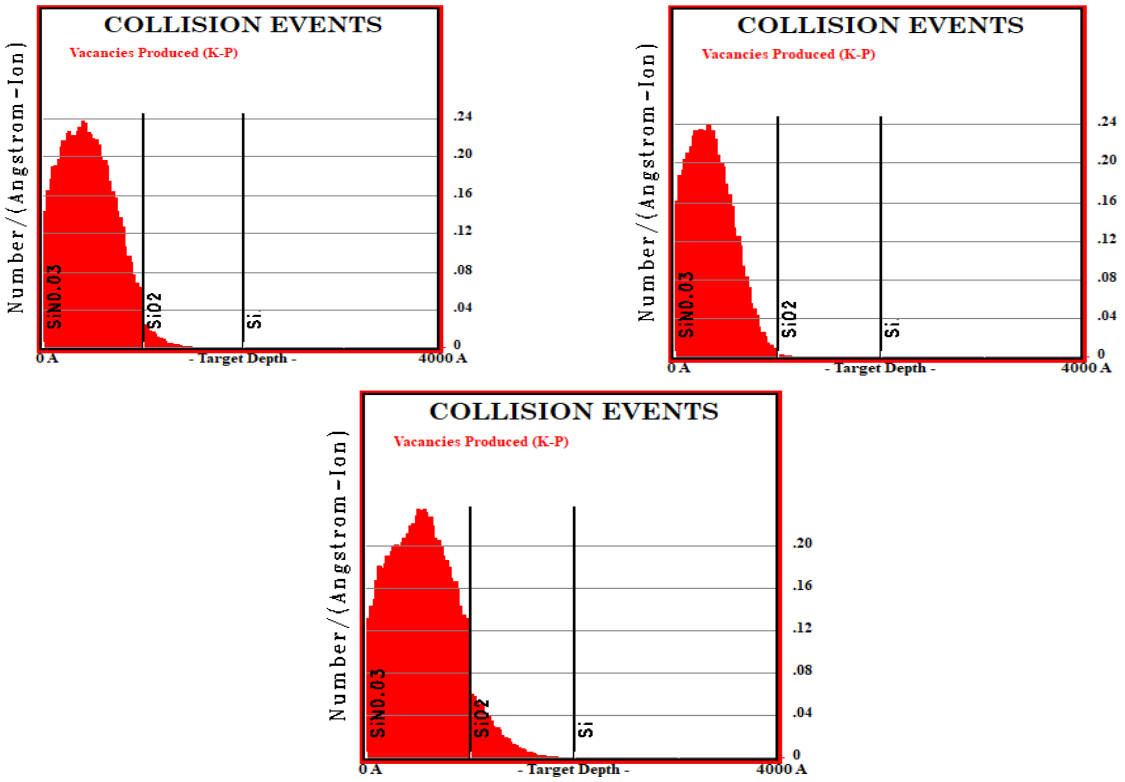


الشكل9.3 : عدد الثغرات التي يتم إنشاؤها بواسطة غرس الكربون حسب كمية الآزوت في الطبقة SiNx

- تغيير في طاقة الزرع

يظهر (الشكل 10.3) تفوق تأثير الأيونات ، نجد أن الطاقة المفقودة على سطح العينة كبيرة و تكون في أقصى قيمتها في منتصف العمق للتوزيع. يتناسب عدد الثغرات المنتجة في هذه الحالة مع تغير طاقة الزرع.

وبملاحظة أخرى، فإن التوسع الزائد مهم مع زيادة الطاقة. كما هو الحال مع العدد الإجمالي للثغرات المرتبطة بزيادة الطاقة.



الشكل 10.3:عدد الثغرات الناتجة عن غرس الكربون في الطبقة SiN0.03 بواسطة الطاقات الناتجة عن الأيونات:

E=15KeV ;E=20keV ;E=25KeV

من خلال مجموعة هذه النتائج، يظهر أن الفجوات موزعة على الطبقة الأولى (SiNx)، وأن عمق توزيع الفجوات أقل من عمق اختراق الكربون بغض النظر عن نسبة مادة الآزوت والطاقة المزروعة.

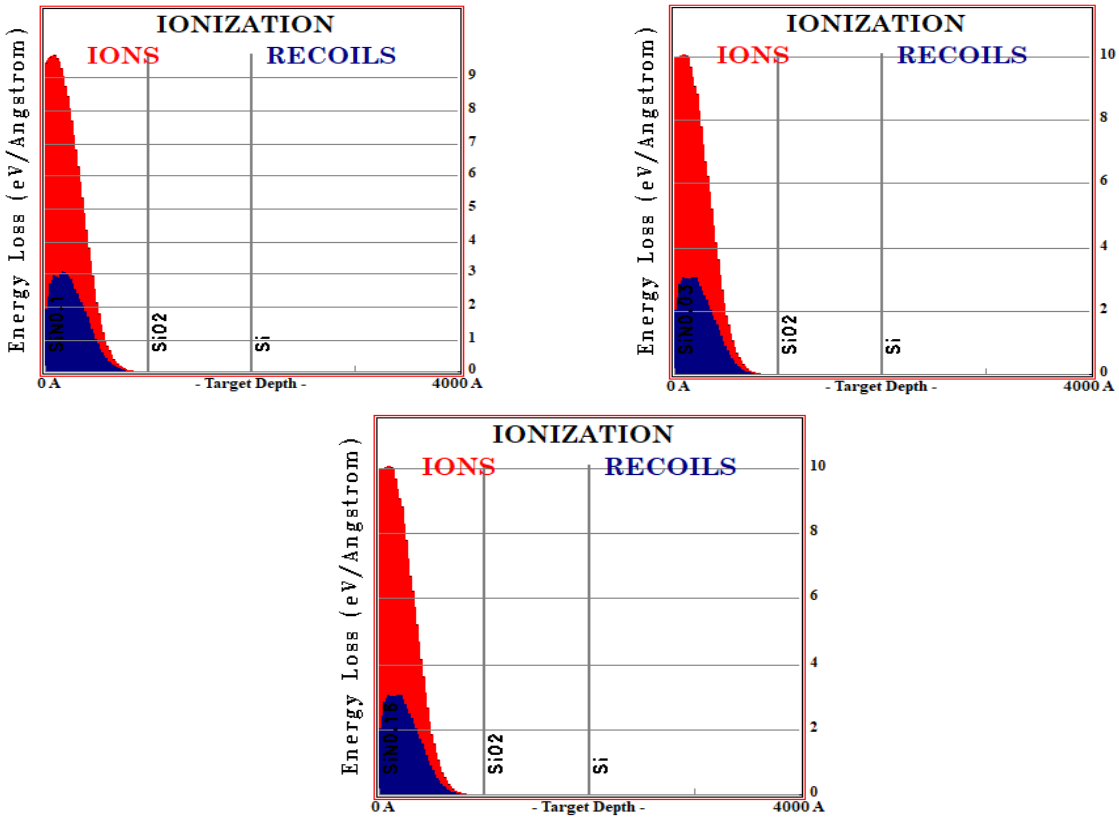
6.3.ظاهرة التأين

يمكن أن تنتج هذه الظاهرة عندما تكون كمية الطاقة المنتقلة نتيجة الاصطدامات غير المرنة كافية لتحرر الذرة إلكترونًا. عندما تكون الطاقة المنتقلة كبيرة، فمن الممكن الحصول على إلكترون إضافي. في جميع الحالات، سيتم تعديل الطاقة الداخلية للذرة. قد يكون هذا التأثير ناتجا عن أيونات الكربون كما هو الحال ،و كذلك عن ذرات الانعكاس ، كما هو موضح في الشكل11.3

- تغير كمية الآزوت في الطبقة

ملاحظة أولية على الشكل 11.3 تؤكد أن الطاقة المفقودة في أيونات الكربون كبيرة جدًامقارنة بالطاقة المفقودة بسبب ذرات الانعكاس على عمق الاختراق بالكامل. في البداية، كل ملف بقيمة قريبة من القيمة

القصوى، مما يشير إلى أن الطاقة المفقودة على السطح يمكن اعتبارها مهمة. من خلال الصورة، يبدأ الملف في التلاشي تدريجيا،مشيرا لتأثير أقل لظاهرة التأين على فقدان الطاقة.



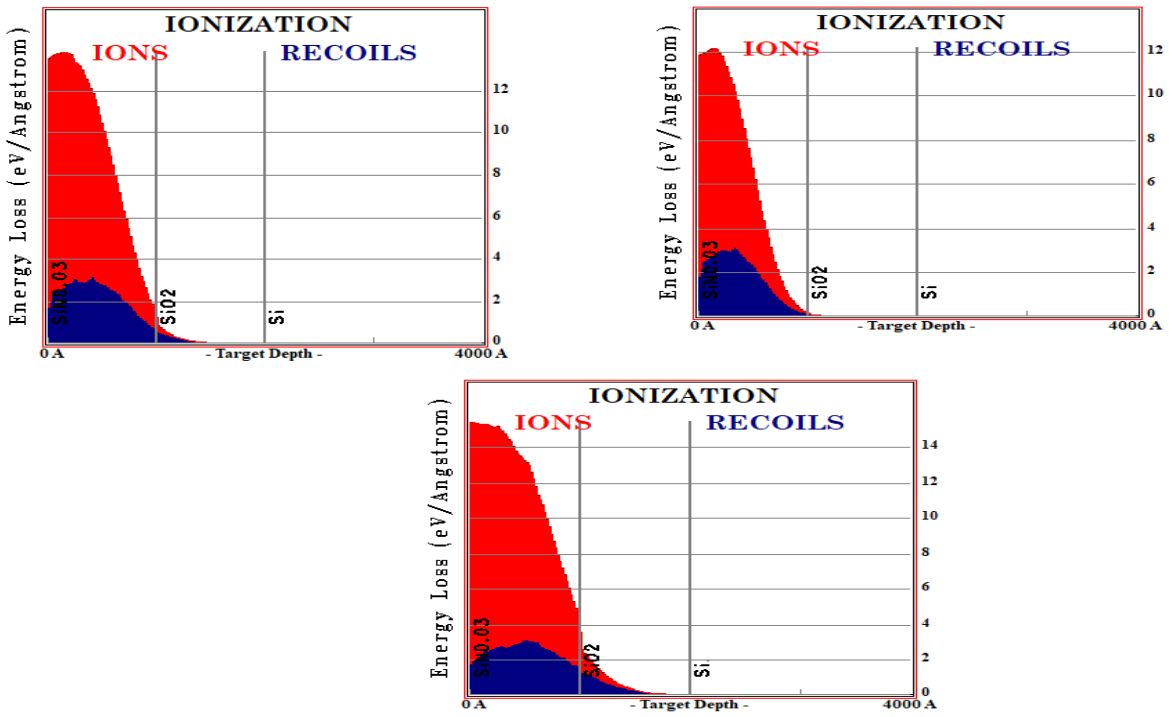
الشكل 11.3 : فقدان الطاقة في الطبقة SiNx نتيجة لظاهرة التأين و ذرات الانعكاس للكوبون مع تاثير كمية الأزوت

نلاحظ أيضًا التناسب بين كمية الطاقة المفقودة ونسبة الآزوت في الهدف . في الواقع، كلما زادت عدد ذرات الآزوت زادت كمية الطاقة المفقودة. هذه النتيجة هي دليل على مساهمة ذرات الآزوت في عملية التأين خلال التشعيع بواسطة الأيونات.

- تغير في طاقة الزرع

يتم الحصول على هذه الحالة (الشكل 12.3) بنفس الشكل الذي يتم تمثيله في الشكل 11.3 مع تفوق تأثير الأيونات. نود أن نشير إلى أن الطاقة المفقودة على السطح هي الأكثر أهمية والأكثر عمقًا لكل ملف. في هذه

المنطقة، يتم ملاحظة تدهور تدريجي. تزداد كمية الطاقة المفقودة بسبب الطاقة الناتجة عن الذرات المزروعة و لكنها تظل أقل مقارنة بالطاقة المستخدمة في الزرع الأيوني.



الشكل 12.3 : فقدان الطاقة في الطبقة SiN0.03 نتيجة لظاهرة التأين و ذرات الانعكاس للكربون مع تاثير كمية الأزوت وتغيير في طاقة الزرع E=25KeV ,E=20KeV ,E=15keV

بغض النظر عن تغيير كمية النتروجين في الطبقة SiNx ومن خلال هذه النتائج ، يتبين أن التأين يظهر في الطبقة SiNx بغض النظر عن كمية النتروجين ، وطاقة الزرع ، و أن الحد الأقصى لفقدان الطاقة يوجد في عمق أقل من توزيع الكربون .

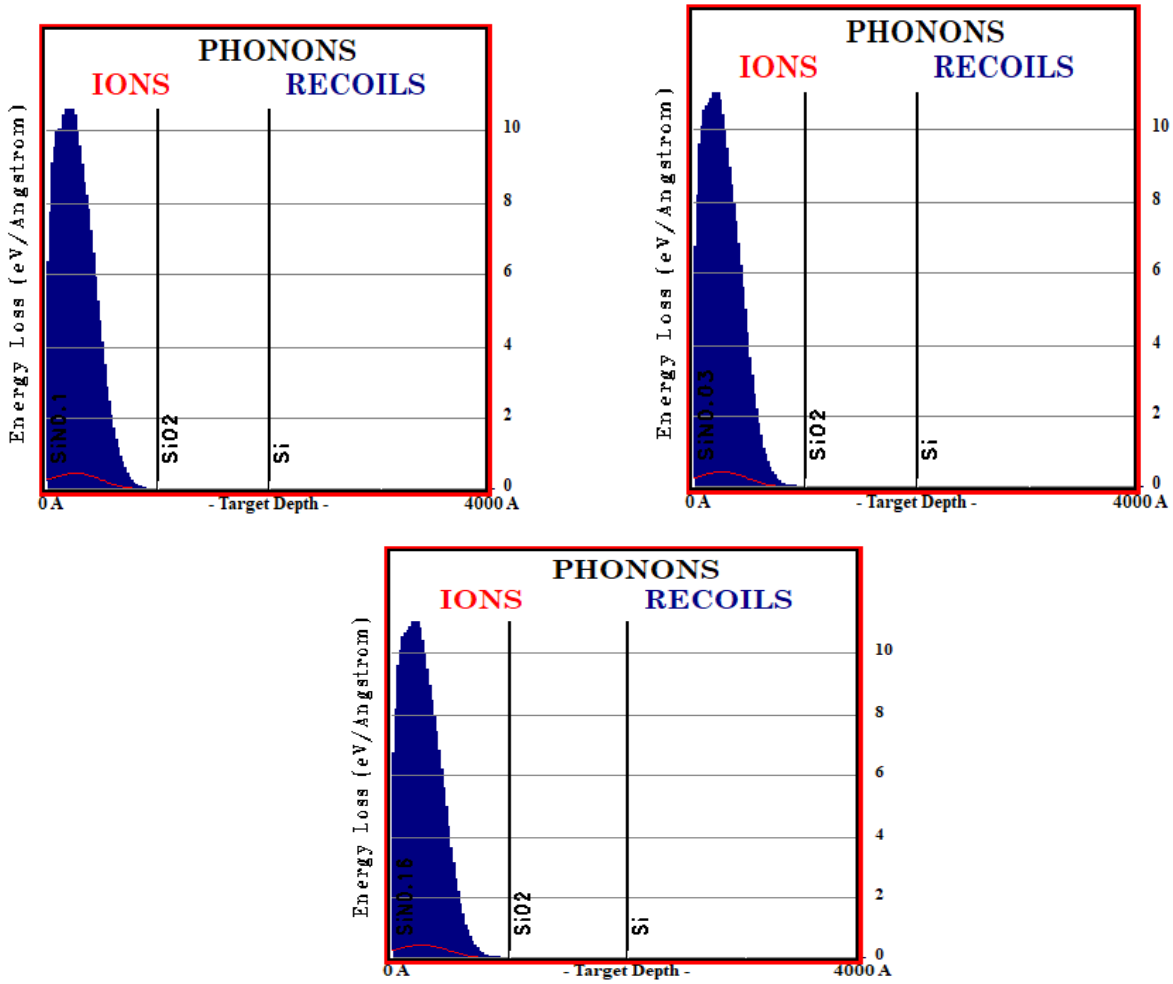
7.3.إنتاج الفونونات

ان انتاج الفونونات يحدث عندما تكرن الطاقة المنقولة الى الذرة المستهدفة أقل من طاقة الحد الأدنى للتحريك في الهدف . يصف الشكل 13.3 هذه الظاهرة مع مراعاة الطاقة المفقودة بوحدة الأنجستروم. على الرغم من

أن هذا التأثير ممكن ان يحدث نتيجة لمساهمة ذرات الكربون الخارجية ، الا أنه يمكن أيضا أن يحدث نتيجة لمساهمة ذرات الارتداد .الشكل يأخذ في عين الاعتبار حالة المحاكاة .

- تباين نسبة التفاعل في الهدف

على عكس ظاهرة التأين ، في حالة الفونون ، فان الطاقة المفقودة من قبل أيونات الكربون ضئيلة للغاية مقارنة بالتي تتلقاها ذرات الارتداد . هذا غض النظر عن نسبة النتروجين في الهيكل .



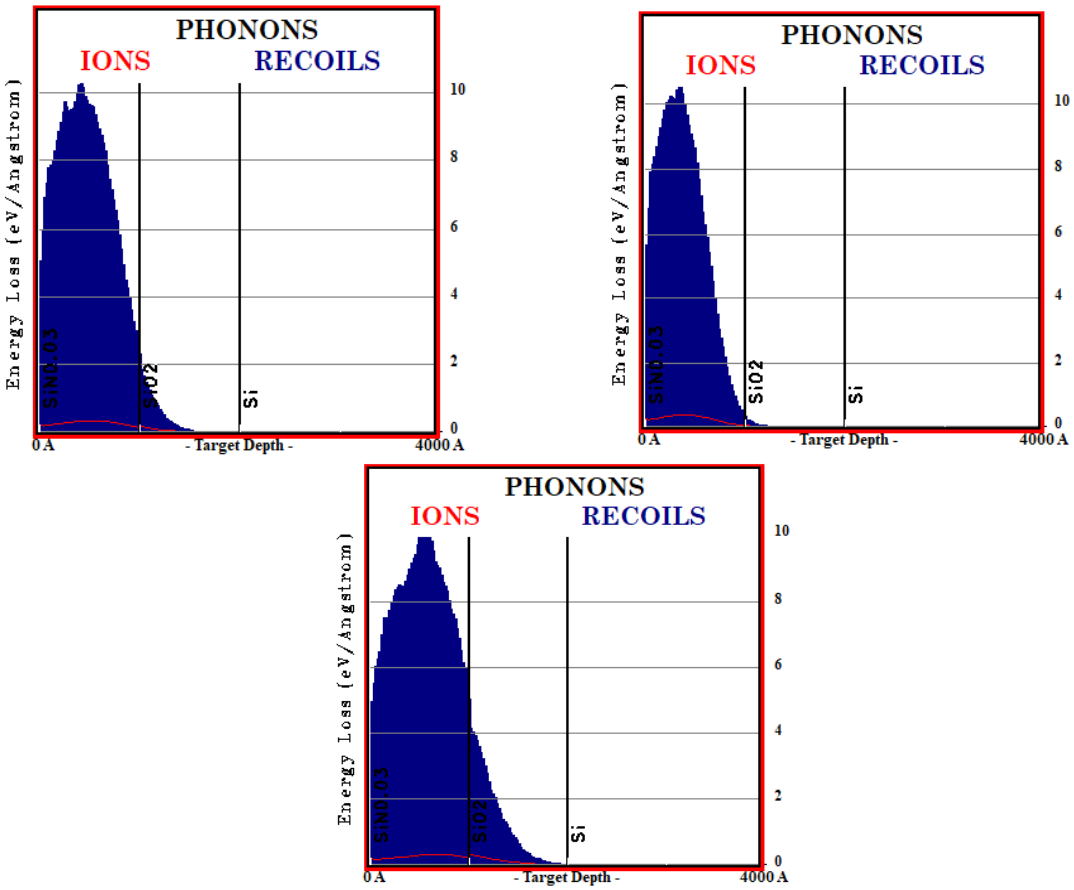
الشكل 13.3 :فقدان الطاقة أثناء انتاج الفونانات في الطبقة SiNx بواسطة أيونات و ذرات الهدف : تأثير كمية النتروجين

يمكن تشبيه التوزيعات التي تم الحصول عليها بواسطة تشبيهات غوسية مركزة عند عمق يعكس أقصى تأثير لانتاج الفونونات على زرع الأيونات .بالنسبة لهذا الاختبار، يلاحظ أن نسبة الكمية المفقودة من الطاقة تتناسب بشكل ملحوظ مع كمية النيتروجين في الهدف في جميع النقاط .فعلى سبيل المثال ، نجد كمية كبيرة من الطاقة المفقودة عندما تكون نسبة النتروجين في الهدف تبلغ 16% .

- تغيير في طاقة الزرع

وفقًا للملف التعريفي الموضح في الشكل 14.3، فإن الطاقة المفقودة بواسطة أيونات الكربون ضعيفة مقارنة بتلك التي يحصل عليها ذرات الارتداد. تحصل التوزيعات على شكل غاوسي تقريبي. تقع كمية الطاقة القصوى المفقودة على عمق متوسط لكل ملف تعريف. يتناسب إجمالي الطاقة المفقودة في هذه الحالة مع

الطاقة الواردة . يمكن أن تكون هذه النتيجة من خلال زيادة التوزيع لانتشار الملامح كل مرة تزداد فيه طاقة الزرع.



الشكل 14.3 : فقدان الطاقة أثناء انتاج الفونونات في الطبقة SiN0.03 بواسطة أيونات القذف و ذرات الهدف مع تغيير في طاقة الزرع : E=25KeV; E=20KeV ;E=15KeV

في الخلاصة، يمكنك ملاحظة أن الفونونات يتم توزيعها دائمًا على الطبقة الأولى. العمق الأقل في هذه الملفات الشخصية هو أقل من عمق اللوح المتوسط (Rp). يؤدي إزالة الصفائح في علبة الاختلاف في كمية الآزوت إلى تنقية الأيونات من الكربون في العمق

خاتمة جزئية

في سياق هذا الفصل، قمنا خلال هذا الفصل بدراسة تأثير التركيب الكيميائي للهدف وطاقة الزرع على تغير ملامح زرع الكربون في السيليسيوم المشوب بالنيتروجين. لهذا الغرض، تمت محاكاة مجموعة متنوعة من الآثار الناتجة عن الزرع الأيوني. أظهرت النتائج أنه من الممكن التعبير باستخدام برمجية TRIM عن تباطؤ الكربون بوجود النيتروجين في السيليسيوم. في الواقع، قمنا بالتعبير عن هذه الظاهرة التي تم مشاهدتها على نطاق واسع تجريبيًا، من خلال اعتبار وجود فوضى أكبر للأهداف التي تحتوي على نسبة أعلى من النيتروجين. النتائج التي تم الحصول عليها من المحاكاة تشير إلى أن اختيار مناسب لكميات النيتروجين وطاقة الزرع يمكن أن يساعد في ضبط عمق اختراق الكربون وفقًا للتطبيق المستهدف.

الخاتمة

تمت دراسة العديد من المعلمات المتعلقة بزرع الكربون في السيليسيوم المطعم بالنيتروجين من خلال هذا العمل. تمت الدراسة باستخدام المحاكاة. خلال المحاكاة، تم تنبؤ العديد من الظواهر. تم دراسة ظاهرة التصادم بين أيونات الكربون وهدف من السيليسيوم البلوري المطعم بالنتروجين . تم أيضًا التنبؤ بعمليات فقدان ونقل الطاقة. تم الحصول على توزيعات مختلفة للأيونات (عمقًا وجانبيًا) وتم تقدير العديد من المعلمات مثل المسار إلخ. تم أيضًا مراعاة دراسة تكوين العيوب. تمكنا من الحصول على التوزيعات المختلفة الممكنة مثل إنتاج الفجوات و ظاهرة التأين و إنشاء الفونون.

تم تحضير العينات SiN0.3 ، SiN0.10، SiN0.16 تم زرع أيونات الكربون في الأهداف باستخدام باستخدام طاقة زرع تتراوح 5 و25 كيلو اكترون فولط .

تم استخدام برنامج TRIM (Transport and Range of Ions in Mater) في هذا العمل لمحاكاة تفاعل الأيونات مع المادة. يستخدم هذا البرنامج طريقة مونت كارلو، وهي أداة رياضية قوية تستخدم لحل العديد من المشكلات المتعلقة بالظواهر العشوائية مثل مسارات الأيونات والإلكترونات في البنية الصلبة للعديد من المواد شبه الموصلة.

معروف أن جميع المواد شبه الموصلة يمكن استخدامها بعد أن تم الشائبة بها بواسطة العناصر الكيميائية مثل تقنيات محاكاة الإلكترونات والأيونات عند القيام .N والفسفور للشائبة من النوع P البور للشائبة من النوع بتجميع سطح المواد معروفة تجريبيًا سواء في المجهر الإلكتروني الماسي كما هو الحال في المجهر الإلكتروني للمسح أو عند تنظيف الأسطح بواسطة الأيونات الأرجون كما هو الحال في معظم عينات المواد شبه الموصلة .قبل إدخالها في غرفة التحليل لتوصيفها باستخدام تقنيات الطيف

لقد لاحظنا أيضًا أن البرنامج المستخدم هو أداة فعالة لتوقع العناصر الكيميائية الأكثر أداءً لشائبة النوعي مادة قبل الانتقال إلى تنفيذ عملية الشائبة نفسها. هذا العمل سمح لنا أيضًا بفهم العديد من الظواهر الفيزيائية ونظرياتها وأعطانا نظرة عامة على تطبيقات الدروس التي تعلمناها من أساتذة الفيزياء النظرية. الفصول الثلاثة المتناولة في هذا الرسالة تعطينا فكرة واضحة عن البحث العلمي وبشكل خاص البحث المتعلق بمحاكاة الظواهر الفيزيائية المرتبطة ارتباطًا وثيقًا بالفيزياء النظرية.

المراجع :

[1] A. Bouzina, Étude de l'effet de l'énergie d'implantation sur les profils de distribution du dopant dans le silicium amorphe, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA.

[2] G. Cirrone, G. Cuttone, F. Di Rosa, S. Guatelli, B. Mascialino, M. Pia, G. Russo, Validation of Geant4 physics models for the simulation of the proton bragg peak, 2006 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE, 2006, pp. 788-792.

[3] A. Bouguerra, R. Labbani, Contribution à l'étude de l'implantation des ions de carbone dans le silicium, Doctoral dissertation, Université des frères mentouri constantine, 2016.

[4] S.-i. Sato, H. Sai, T. Ohshima, M. Imaizumi, K. Shimazaki, M. Kondo, Anomalous enhancement in radiation induced conductivity of hydrogenated amorphous silicon semiconductors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 286 (2012) 29-34.

[5] M. Birkholz, B. Selle, W. Fuhs, S. Christiansen, H. Strunk, R. Reich, Amorphous-crystalline phase transition during the growth of thin films: The case of microcrystalline silicon, Physical Review B 64(8) (2001) 085402.

[6]بوزيان, بختة, محاكاة عددية بطريقة التحريك الجزيئي لمادة زجاجية ,sio2 جامعة قاصدي مرباح ورقلة.

[7]سرار, حمزة, لعباني, ربيحة, أمثلة زرع أيوني الأنتموان و الزرنيخ في السليكون جلمعة الاخوة منتوري قسنطينة 1

[8] S. Blanqué, Optimisation de l'implantation ionique et du recuit thermique pour SiC, Universitat Autònoma de Barcelona2005.

[9] A. Bensaada, Technologie des Semi-conducteurs, Office des Publications Universitaires, Alger, 1994.

[10] L. Ottaviani, Réalisation de jonctions pn dans le SiC-6H par implantation ionique d'aluminium, Lyon, INSA, 1999.

[11] J. Lindhard, M. Scharff, H.E. Schiøtt, Range concepts and heavy ion ranges, Munksgaard Copenhagen1963.

[12] M. Nastasi, J. Mayer, J.K. Hirvonen, Ion-solid interactions: fundamentals and applications, Cambridge University Press1996.

[13] D. Akinwande, C. Huyghebaert, C.-H. Wang, M.I. Serna, S. Goossens, L.-J. Li, H.-S.P. Wong, F.H. Koppens, Graphene and two-dimensional materials for silicon technology, Nature 573(7775) (2019) 507-518.

[14] C.K. Chan, H. Peng, G. Liu, K. McIlwrath, X.F. Zhang, R.A. Huggins, Y. Cui, High-performance lithium battery anodes using silicon nanowires, Nature nanotechnology 3(1) (2008) 31-35.

[15] L.T. Canham, Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers, Applied Physics Letters 57 (1990) 1046-1048.

[16] F.H. Stillinger, T.A. Weber, Computer simulation of local order in condensed phases of silicon, Physical review B 31(8) (1985) 5262.

[17] http://www.ion-beam-services.com

[18] M.B. Lazar, Etude du Dopage par Implantation Ionique d'Aluminium dans le Carbure de Silicium pour la Réalisation de Composants de Puissance, Lyon, INSA, 2002.

[19] E. Darque-Ceretti, M. Aucouturier, P. Lehuédé, Spectrométrie de masse d'ions secondaires: SIMS et ToF-SIMS-Principes et appareillages, Editions TI, 2014.

[20] J. Lindhard, M. Scharff, Energy dissipation by ions in the keV region, Physical Review 124(1) (1961) 128.

[21] M.Z. Echcherki Hanane, Simulation du dopage du semi-conducteur par TRIM software, (2019).

[22] P. Patard, Alain, Outils numériques pour la simulation Monte Carlo des produits dérivés complexes, Bulletin français d'actuariat 7(14) (2007) 74-117.

[23] B. Nadia, Application de la méthode de Monte Carlo à l'étude de l'interaction rayonnement-matière codes TRIM et Casino, (2016).

الملخص :

هناك العديد من طرق التطعيم للمواد الشبه الموصلية نذكر منها : التطعيم عن طريق التحويل النووي ، تطعيم بتقنية الليزر، التطعيم عن طريق قذف الأيونات في هذا العمل، تمت دراسة عدة معاملات متعلقة بزرع الأيونات للكربون في السيليكون عبر محاكاة،الذي يسمح لنا بتوقع ظواهر التصادم . تمت عملية التمثيل باستخدام البرنامج بين أيونات الكربون وهدف من السيليكون المطعم بالنتروجين يدعى.SRIM

من الناحية التجريبية، تم إعداد العينات SiNx/SiO2/Siعن طريق زرع أيونات C+ في هذة العينات و من نتائج هذه المحاكاة تم دراسة المعاملات متعددة ذات علاقة بالتطعيم بنوعيه نذكر منهم :حساب تركيز التطعيم ,فقدان الطاقة للأيونات داخل المصفوفة البلورية للمادة , ،طاقات الأيونات الارجاعية ، والأيونات المبعثرة،الفونونات .وتم دراسة تغيرات هذه المعاملات وتسجيل منحنياتها بدلالة طاقة قذف الايونات وتمت مقارنة النتائج المتحصل عليها ومناقشتها .

Abstract

There are several methods of doping for semiconducting materials, including nuclear implantation, laser doping, and ion implantation. In this work, various parameters related to ion implantation of carbon into silicon were studied through simulation, allowing us to predict collision phenomena. The simulation was conducted using the SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) program to represent the interactions between carbon ions and a silicon target doped with nitrogen.

From an experimental perspective, SiNx/SiO2/Si samples were prepared by implanting C+ ions into these samples. The results of this simulation led to the study of multiple parameters related to doping, including doping concentration, energy loss of ions within the crystalline matrix of the material, recoil ion energies, and scattered ions, as well as phonon vibrations. Changes in these parameters were investigated, and their curves were recorded as a function of ion implantation energy. The obtained results were compared and discussed.