

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الاخوة منتوري - قسنطينة 1-

كلية العلوم الدقيقة

قسم الفيزياء

رقم التسجيل:

السلسلة:

رسالة

مقدمة لنيل شهادة الدكتوراه في العلوم في الفيزياء

تخصص علوم المواد

فرع أنصاف النواقل

العنوان

أمثلة زرع أيوني الأنتيموان و الزرنيخ في السليكون

من طرف

سرار حمزة

تاريخ المناقشة : 2017 / 03 / 12

أمام لجنة المناقشة :

بوبرطخ عبد الحميد	أستاذ	رئيسا	جامعة الاخوة منتوري - قسنطينة 1-
لعباني ربيعة	أستاذة	مقررة	جامعة الاخوة منتوري - قسنطينة 1-
زعباط مراد	أستاذ	عضوا	جامعة أم البواقي
محامدي رمضان	أستاذ	عضوا	جامعة باتنة 2
نويري عبد القادر	أستاذ	عضوا	جامعة أم البواقي

تشكرات

هذا العمل تم انجازه على مستوى مخبر الفيزياء الرياضية و دون الذرية (LPMPS) بقسم الفيزياء، كلية العلوم الدقيقة، جامعة الإخوة منتوري -قسنطينة1- و ذلك تحت إشراف الأستاذة **لعباني ربيحة**.

أنقدم بجزيل الشكر و العرفان إلى الأستاذة **لعباني ربيحة** أستاذة بقسم الفيزياء كلية العلوم الدقيقة بجامعة الإخوة منتوري-قسنطينة1- على اقتراحها و إشرافها على هذه الرسالة، وكذا مساهمتها في انجازها ومتابعتها المستمرة للعمل، كما أنها لم تبخل علينا بتوجيهاتها و نصائحها القيمة التي كانت سندا لنا و تقديمها لنا يد العون و المساعدة و تزويدنا بالمعلومات اللازمة لإتمام هذه الرسالة.

كما أشكر الأستاذ **بوبرطخ عبد الحميد** أستاذ بقسم الفيزياء بجامعة الإخوة منتوري-قسنطينة1- على تفضله برئاسة لجنة المناقشة.

كما أتوجه بشكري أيضا إلى كل من الأساتذة:

- **زعباط مراد**، أستاذ بقسم الفيزياء بجامعة أم البواقي على موافقته المشاركة كعضو ممتحن في لجنة المناقشة.

- **محامدي رمضان**، أستاذ بقسم الالكترونيك بجامعة باتنة 2 على موافقته المشاركة كعضو ممتحن في لجنة المناقشة.

- **نويري عبد القادر**، أستاذ بقسم الفيزياء بجامعة أم البواقي على موافقته المشاركة كعضو ممتحن في لجنة المناقشة.

كما لا يفوتني أن أشكر الباحث **بن عزوز شوقي** مدير أبحاث في مركز تطوير التقنيات النووية -الجزائر العاصمة- على مساعدته لنا في تحضير العينات بتقنية الزرع الأيوني و كذلك معالجتها حراريا. كما أشكر كل أعضاء هذا الفريق المنتمي لهذا المركز (**حمودي، معمري ستر، هجرسي توفيق، طحطاط، رحال باديس، بوشحم عبد الغاني.....**) على مساعدتهم لنا في تحليل العينات بواسطة تقنية RBS, PL, FTIR, DRX, Résistivité. كما لا أنسى زملائي في فرقة البحث الطالب **قندوز حسان** و الأستاذ **عمار بوقرة** من جامعة قسنطينة3. أشكر أيضا الأستاذة **منصور فريدة** (قسم الالكترونيك) جامعة الإخوة منتوري قسنطينة1 على مساعدتها من أجل تحليل العينات.

كما نشكر الدكتور **Matthias Posselt** على منحه لنا برنامج **C-TRIM** لاستغلاله في محاكاة أثر زرع الأيونات في المادة الصلبة أحادية التبلور. كما نشكر الدكتور **E.Kotai** على منحه لنا برنامج **RBX** لاستغلاله في محاكاة و تحليل أطياف RBS المتحصل عليها بواسطة الهندسة العشوائية أو التوجيهية.

كما نشكر الدكتور **Matej Mayer** على منحه لنا برنامج **SIMNRA** لتحليل الأطياف RBS. أشكر في الأخير جميع زملاء و الأصدقاء بوحدة البحث فيزياء المواد جامعة الإخوة منتوري -قسنطينة1- **هاروني سفيان، عواطي رضا، بودايرة بوخميس، طعبوش عادل.**

كما أتقدم بجزيل الشكر إلى كل من ساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذه الرسالة.

الفهرس

01	.....	مقدمة عامة
		الفصل الأول : مبادئ عامة حول التفاعلات أيون-مادة
04	.....	1- مقدمة
04	.....	2- العناصر الكيميائية المستعملة
04	.....	1-2 السليكون
08	.....	2-2 الأتيموان
09	.....	3-2 الزرنيخ
11	.....	3- التفاعلات أيون-مادة
11	.....	1-3 الخصائص المميزة للزرع الأيوني
13	.....	2-3 مزايا و عيوب تقنية الزرع الأيوني
13	.....	1-2-3 أهم المزايا الأساسية للزرع الأيوني
14	.....	2-2-3 أهم العيوب الأساسية للزرع الأيوني
14	.....	3-3 نظريات تباطؤ وتوقف الأيونات في مادة
18	.....	1-3-3 قدرة التوقف النووي
20	.....	2-3-3 قدرة التوقف الإلكتروني
21	.....	4- توزيع الأيونات المزروعة
24	.....	5- أثر الاستثناء على الأيونات المزروعة
25	.....	6- توزيع العيوب في المادة بعد عملية الزرع
27	.....	7- البرامج المستعملة لمحاكاة ظاهرة الزرع الأيوني
27	.....	1-7 برنامج SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter)
31	.....	2-7 برنامج CRYSTAL-TRIM
35	.....	8- خاتمة جزئية
		الفصل الثاني : تقنيات التحليل التجريبي
36	.....	1- مقدمة
36	.....	2- مطيافية الانتشار الارتدادي لروذرفورد RBS

37	..... 3- مزايا و عيوب تقنية RBS
37	..... 1-3 أهم مزايا هذه التقنية
37	..... 2-3 أهم حدود هذه التقنية
38	..... 4- الجهاز التجريبي
39	..... 5- المبدأ الفيزيائي لتقنية RBS
40	..... 1-5 عامل الحركة K (عامل الانتشار)
41	..... 2-5 المقطع الفعال للانتشار
42	..... 3-5 فقدان الطاقة
45	..... 4-5 تشتت الطاقة
45	..... 6- مطيافية الانتشار الارتدادي لروذرفورد باستعمال هندسة الاستقناء
46	..... 7- المبدأ الفيزيائي لطريقة RBS/C
46	..... 1-7 أساس نظرية ليندهارد
48	..... 2-7 الزاوية الحرجة للاستقناء
51	..... 3-7 مردود الاستقناء
52	..... 4-7 عدم الاستقناء والعيوب الموجودة في البلورة
55	..... 5-7 تحديد سمك الطبقة غير المبلورة
55	..... 6-7 تحديد موقع الذرات في البلورة
57	..... 8- البرامج المستعملة لمحاكاة أطياف RBS التجريبية
58	..... 1-8 برنامج RUMP(Rutherford Universal Manipulation Program)
60	..... 2-8 برنامج SIMNRA
63	..... 3-8 برنامج RBX
65	..... 9- مطيافية انعراج الأشعة السينية DRX
68	..... 10- مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه FTIR
71	..... 1-10 أنماط الاهتزاز
74	..... 11- مطيافية التآلق الضوئي PL
78	..... 12- تقنية الأربع نقاط لقياس المقاومة النوعية

80	..... 13- خاتمة جزئية
	الفصل الثالث : محاكاة التفاعل أيون-مادة أثناء عملية الزرع الأيوني
81	..... 1- مقدمة
81	..... 2- محاكاة تفاعل أيون-مادة و التنبؤ بالمعاملات الخاصة بالزرع الأيوني
81	..... 1-2 استعمال برنامج SRIM
81	..... 1-1-2 الشروط المستعملة في المحاكاة
82	..... 2-1-2 دراسة قدرة توقف أيوني Sb^+ و As^+ في السليكون كهدف
84	..... 3-1-2 تأثير طاقة الزرع على معاملات توزيع الأيونات داخل الهدف
86	..... 4-1-2 محاكاة توزيع الأيونات داخل الهدف في بعدين
88	..... 5-1-2 محاكاة بعض الظواهر الفيزيائية الخاصة بالتفاعل أيون-مادة
88	..... أ- ظاهرة التآين و الفونونات أثناء الزرع الأيوني
91	..... ب- نشأة الفجوات في الهدف أثناء الزرع الأيوني
93	..... 6-1-2 محاكاة توزيع الأيونات في عمق الهدف
97	..... 2-2 استعمال برنامج CRYSTAL-TRIM
97	..... 1-2-2 الشروط المستعملة في المحاكاة
97	..... 2-2-2 دراسة فقدان الطاقة لأيوني Sb^+ و As^+ أثناء زرعها في هدف من السليكون
99	..... 3-2-2 محاكاة توزيع الأيونات و دراسة توجيه الهدف بالنسبة لحزمة الأيونات
102	..... 4-2-2 دراسة توزيع العيوب في المادة بعد عملية الزرع
104	..... 5-2-2 تأثير التوجيه البلوري لسطح الهدف على توزيع الأيونات في المادة
107	..... 6-2-2 مقارنة توزيع الأيونات داخل الهدف بين SRIM و C-TRIM
110	..... 3- خاتمة جزئية
	الفصل الرابع : الدراسة التجريبية للعينات المزروعة
111	..... 1- مقدمة
111	..... 2- تحضير العينات
113	..... 3- النتائج التجريبية
113	..... 1-3 تحليل العينات بتقنية RBS

113	..... 1-1-3 الشروط التجريبية المستعملة في تقنية RBS
115	..... 2-1-3 النتائج التجريبية الخاصة بتقنية RBS
115	..... 1-2-1-3 دراسة إشارة السليكون
121	..... 2-2-1-3 دراسة إشارة الأتيموان
123	..... 3-2-1-3 تقدير معاملات زرع أيون Sb^+ في Si (111)
129	..... 4-2-1-3 دراسة توزيع العيوب داخل العينة
131	..... 5-2-1-3 دراسة بئر الاستثناء
135	..... 2-3 تحليل العينات بتقنية DRX
135	..... 1-2-3 الشروط التجريبية المستعملة في تقنية DRX
135	..... 2-2-3 النتائج التجريبية الخاصة بتقنية DRX
139	..... 3-3 تحليل العينات بتقنية FTIR
139	..... 1-3-3 الشروط التجريبية المستعملة في تقنية FTIR
139	..... 2-3-3 النتائج التجريبية الخاصة بتقنية FTIR
142	..... 4-3 تحليل العينات بتقنية PL
142	..... 1-4-3 الشروط التجريبية المستعملة في تقنية PL
142	..... 2-4-3 النتائج التجريبية الخاصة بتقنية PL
144	..... 5-3 تحليل العينات بتقنية الأربع نقاط
144	..... 1-5-3 الشروط التجريبية المستعملة في تقنية الأربع نقاط
144	..... 2-5-3 النتائج التجريبية الخاصة بتقنية الأربع نقاط
148	..... 4- خاتمة جزئية
149	..... خاتمة عامة
151	..... المراجع
160	..... ملحق 1 ترجمة بعض المصطلحات العلمية
162	..... ملحق 2 قائمة لأهم الرموز و الاختصارات
168	..... ملحق 3 قائمة المداخلات العلمية الوطنية و الدولية
169	..... ملحق 4 المنشورات العلمية

مقدمة عامة

مقدمة عامة:

يعتبر اكتشاف المواد نصف الناقل من أهم العوامل التي ساهمت في النهضة التكنولوجية و العلمية لهذا العصر. حيث أن جل الأجهزة الإلكترونية المستعملة في حياتنا اليومية مبنية أساسا على هذه المواد. فقبل استغلال هذه المواد يتوجب علينا تطعيمها لتحسين أداء خصائصها المختلفة، لذلك فإن عملية تطعيم أشباه الموصلات في مجال الإلكترونيك الدقيقة تعتبر مرحلة تكنولوجية شديدة الأهمية في انجاز الدوائر المدمجة. ففي البداية كانت طريقة الانتشار الحراري هي السائدة و المستخدمة لإدخال الشوائب في رقائق أشباه الموصلات. ومع ذلك، فإن هذه الطريقة لا يمكن أن تلبى الاحتياجات المتزايدة للصناعة بسبب الوصلات المتحصل عليها و التي كانت عميقة نوعا ما. لذلك فإن صناعة المركبات الالكترونية التي يدخل في تركيبها السليكون تتطلب مراقبة دقيقة نسبيا لنوع، تركيز، توزيع و عمق التغلغل للشوائب داخل المادة الشبه موصلة. وقد مكنت التطورات في مجال البحث العلمي من ظهور تقنية جديدة تلبى هذه الاحتياجات تدعى بالزرع الأيوني. نظرا لمزاياها المهمة مقارنة بالانتشار الحراري، فهي تطبق أيضا في عدة مجالات من بينها التعدين والخزفيات، و علم الأحياء. الخ. مبدأ هذه التقنية يتلخص في أنها عملية قذف الهدف بأيونات مسرعة، يجعلها تخترق الطبقات السطحية بكمية يمكن السيطرة عليها. و من المثير للاهتمام بشكل خاص في تصنيع الوصلات السطحية هو أن عمق التغلغل أقل من $0.1\mu\text{m}$.

تبعاً للتصادمات بين القذائف الواردة و ذرات الهدف، سوف تنشأ أضرار بنيوية مهمة في الشبكة تكون في المناطق السطحية و تكون الأيونات في هذه الحالة موزعة بشكل عشوائي في المسند. لذلك يجب أن نسجل بأنه من أجل كثافة عيوب عالية، المنطقة المزروعة تمر من حالة مبلورة إلى حالة غير

مبلورة. غالبا ما تستخدم المعالجة الحرارية في درجات حرارة عالية لإصلاح العيوب و التنشيط الكهربائي للشوائب.

في إطار هذا العمل ، نقتراح دراسة أيونات الأنتيمون و الزرنيخ المزروعة كل على حدى في السليكون.

وستتألف دراستنا من جزئين رئيسيين. في الأول سوف تكون الدراسة عن طريق المحاكاة من أجل التنبؤ بمختلف الظواهر التي تحدث خلال التفاعلات أيون-مادة، مع إبراز معاملات الزرع الأيوني التي تعطي لنا نظرة عن توزيع الأيونات داخل المادة. في حين الجزء الثاني، سوف يخصص للعمل التجريبي الذي يسمح لنا برؤية الحالة الحقيقية للأنتيمون أو الزرنيخ في السليكون.

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

الفصل الأول 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 هما SRIM و C-TRIM .

الفصل الثاني سوف يكون مخصصا لإعطاء المبادئ الأساسية للتقنيات التجريبية المستعملة تحديدا: مطيافية الانتشار الارتدادي لرونرورد (RBS) في حالة الهندسة العشوائية و الموجهة، مطيافية انعراج الأشعة السينية (DRX)، مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR)، و في الأخير سوف ننهي بتقنيتي مطيافية التآلق الضوئي (PL) دون أن ننسى تقنية الأربع نقاط لقياس المقاومة (quatre points).

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 الفصل الرابع، سوف يتم دراسة و مناقشة النتائج التجريبية و مقارنتها بالتنبأ المتحصل عليه

بالمحاكاة. كما سيتم أيضا إجراء مقارنة مع المراجع، و تقديم في الأخير خاتمة جزئية.

في الأخير ننهي هذه الرسالة بخاتمة عامة نثير فيها النقاط الأساسية. كذلك، سوف نقترح الآفاق

الممكنة لهذا العمل.

الفصل الأول

مبادئ عامة حول التفاعلات أيون-مادة

1- مقدمة :

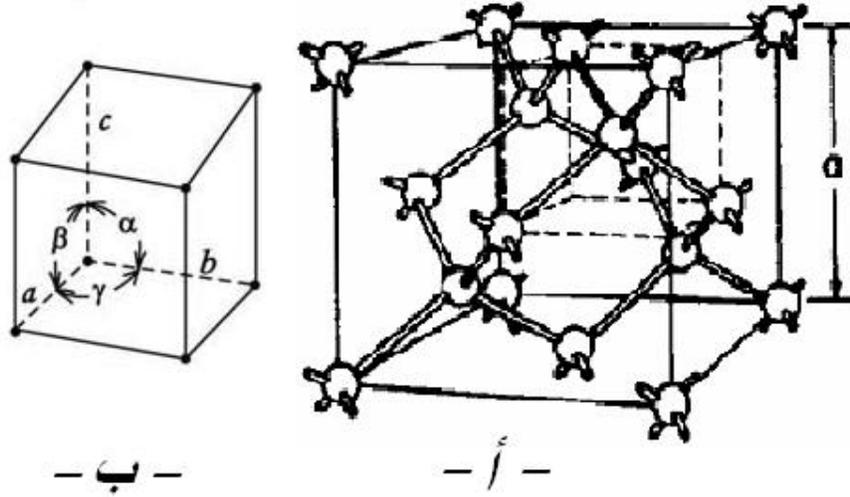
عملية التطعيم في أشباه الموصلات هي مرحلة تكنولوجية في غاية الأهمية في انجاز الدوائر المدمجة. فغالبا ما يتم تنفيذها بواسطة تقنية تدعى بالزرع الأيوني التي تمتلك مزايا لا يمكن إنكارها مقارنة بعملية الانتشار الحراري [1]. على العموم، تصنف العناصر الأكثر استعمالا لتطعيم السليكون إلى نوعين. النوع الأول يخص التطعيم بالنوع P كالبور و الأنديموم. أما النوع الثاني فهو التطعيم بالنوع N و يقتصر على الفوسفور، الزرنيخ و الأنتيموان. 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 الأنتيموان أو الزرنيخ (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 و توقف الأيونات في المادة.

و في الأخير، سوف نتطرق إلى الجزء الخاص بالمحاكاة. بحيث، نعطي لمحة عامة عن البرنامجين SRIM و C-TRIM المستعملين من أجل التنبؤ بالتأثير الفيزيائية الخاصة بتباطؤ و توقف الأيونات في المادة أثناء استعمال تقنية الزرع الأيوني.

2- العناصر الكيميائية المستعملة:**1-2 السليكون :**

السليكون هو أحد العناصر الكيميائية الموجودة في الجدول الدوري ذو الرقم الذري "14"، رمزه Si. و هو عنصر كيميائي رباعي التكافؤ، بمعنى أنه يمتلك أربعة إلكترونات حرة يستطيع من خلالها أن ينشئ روابط إلكترونية مع العناصر الأخرى. بالإضافة إلى ذلك، فإن السليكون يمتلك بنية بلورية من

النوع ألماس (الشكل (1-أ)) مع معامل شبكة يقدر بـ $a=5.43\text{\AA}$ و كذلك زوايا أساسية تقدر بـ $(\alpha=\beta=\gamma=90^\circ)$ (الشكل (1-ب)). بعض الخصائص الكيميائية و الفيزيائية للسليكون ملخصة في الجدول (1).



الشكل (1): أ- الخلية الأساسية للسليكون ذات البنية البلورية ألماس، ب- رسم توضيحي للزوايا الأساسية للخلية الأساسية (بنية الألماس) [3-1].

من المهم أن نعطي معلومة هامة تتعلق بالسليكون و هي أنه أكثر العناصر وفرة في القشرة الأرضية بعد الأوكسجين، بحيث يُشكّل السليكون ما نسبته 28% من النسبة الكلية لكتلة القشرة الأرضية ، لكن الواقع يقول بأن السليكون لا يتواجد بوفرة في القشرة الأرضية فقط، بل إنه وافر جداً بالكون، حيث تشير التقديرات إلى أن السليكون هو ثامن أكثر عنصر وفرة بالكون، فلو أخذنا كل العناصر والمركبات التي يدخل السليكون بتركيبها، فإنها تشكل قرابة 90% من كتلة القشرة الأرضية [4-6]. وعلى الرغم من التواجد الكبير للسليكون ضمن القشرة الأرضية، فإننا لن نتوقع أن نجده بهذه السهولة لأنه ليس بالأمر الهين تكنولوجيا و اقتصاديا [2]. وذلك لأن السليكون تقريباً لا يتواجد بحالته النقية في

الطبيعة، بل يتواجد ضمن مركبات كيميائية أخرى، مثل السليكات ، وهو رباعي أوكسيد السليكون SiO_4 ، أو السيليكا ، وهو ثنائي أكسيد السليكون. بالنسبة لهذا المركب الأخير (أي السيليكا)، فإنه من المهم أن نعرف أنه أحد المكونات الأساسية للرمل. بكل الأحوال، يوجد العديد من المركبات الطبيعية الأخرى التي يتواجد فيها مركبات تعتمد على السليكون والأوكسجين، مثل الغرانيت والكوارتز [7،8].

من بين المميزات العديدة التي يتمتع بها السليكون هو أن مركباته تمتلك العديد من الخواص التي يمكن الاستفادة منها، وذلك بسبب قدرتها على إنشاء روابط مع ذرات أخرى بسهولة شديدة، وضمن ترتيبات متنوعة ومعقدة. فالعديد من مركبات السليكات مثل سليكات الكالسيوم تشكل اللبنة الأساسية لتكوين اسمنت بورتلاند ، والجص. كذلك يمكن لبعض المركبات الغنية بالسليكات أن يتم تسخينها من أجل تشكيل السيراميك الصلب، مثل البورسلان، بينما يمكن لبعضها الآخر أن يتم صهره من أجل تشكيل النمط الأساسي من الزجاج المستخدم عالمياً. يمكن أيضاً أن يتم استخدام السليكون كمركب إضافي لركائز أخرى مثل الحديد الصلب، والذي يعتمد على الكربون والسليكون للحصول على مرونة أكبر، وهشاشة أقل [9،10].

أما في مجال الصناعة الحاسوبية، فالسليكون يعتمد عليه في صنع الرقائق الحاسوبية المختلفة، من معالجات صغيرة ، إلى الذواكر المختلفة، وحتى العديد من الدارات المتكاملة المختلفة التي تستخدم في اللوحات الإلكترونية. من جهة أخرى فقد ساعد غزو الفضاء على ازدهار بحوث الطاقة الشمسية للحصول على مصادر الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل الأجهزة على سفن الفضاء. فكانت صناعة الخلايا الشمسية (التي يدخل في تصنيعها السليكون) ذات كفاءة تحويل للطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية [2]. و فضلاً عن ذلك، فالخلايا الشمسية قد تبوأ مكاناً ذو أهمية كبيرة في التطبيقات المختلفة على سطح الأرض مثل الإنارة، الأجهزة الكهربائية، التبريد و التدفئة.

إن العنصر الأساسي الذي يتم صنع أي دائرة متكاملة منه هو الترانزستور. بالنسبة لهذا الأخير، ومن أجل الحصول على ميزته الأساسية التي تكمن في القدرة على الفتح (الفصل) والإغلاق (الوصل) بسرعة، فإنه علينا أن نأخذ بعين الاعتبار عامل أساسي وهام و هو المقاومة. لذلك فإننا لن نستطيع الاستفادة من النواقل، كونها تتواجد دوماً بحالة "وصل"، أو العوازل، كونها تتواجد دوماً بحالة "فصل". نحن بحاجة لمادة تستطيع أن تعمل بكلا النمطين، وهنا يكون الحل باستخدام مادة نصف ناقلة. إذا الميزة الأساسية لأنصاف النواقل أنها تمتلك قيمة مقاومة كهربائية تقع في المجال ما بين الناقلية و العازلية. في هذه الحالة، نحن بحاجة لمادة نصف ناقلة كي نقوم بتركيب الترانزستور، والذي نحتاجه من أجل تركيب الدارات المتكاملة والرقاقات الحاسوبية. هنا يأتي الدور السحري للسليكون، من حيث كونه يتمتع بخواص نصف ناقلة. و في تطور هام أمكن حديثاً زرع جرعات كبيرة من ذرات الأكسجين بداخل السليكون، و بالتالي أمكن تكوين طبقة أكسيد السليكون SiO_2 في عمق الرقائق مما يفتح المجال لتكنولوجيا السليكون فوق عازل (Silicon On Insulator) SOI و التي تسمح بوجود عدة ملايين من النبائط (مكونات الكترونية تصنع من مواد شبه موصلة مثل الثنائي المضيء، ثنائي زينير) في دائرة متكاملة واحدة [1].

يجب أن نشير هنا إلى أمر هام: السليكون ليس المادة نصف الناقلة الوحيدة المتواجدة على سطح الأرض، وليس حتى أفضلها! ففي الواقع، فإنه يوجد العديد من المواد الأخرى التي تتمتع بخواص نصف ناقلة وخواص ناقلية إلكترونية أفضل من السليكون، مثل الجرمانيوم وأرسنيد الغاليوم، ولكن التوافر الهائل للسليكون في القشرة الأرضية وسهولة استخراجها تجعل منه المادة الأنسب من أجل الصناعة التقنية [7].

2-2 الأنتيموان :

هو أحد العناصر الكيميائية الموجودة في الجدول الدوري ذو الرقم الذري "51"، رمزه Sb. هناك بعض الخصائص الكيميائية و الفيزيائية للأنتيموان ملخصة في الجدول(1).

يدعى الأنتيموان كذلك بالكحل أو حجر "الإثمد" يتواجد في أصفهان والمغرب, وهو معدن لامع ذو تركيب رقائق بلون أبيض فضي هشّ سريع التفتت. بحيث عند طحنه يصبح ممكنا استخدامه على شكل مسحوق لتكحيل العيون. يتواجد هذا العنصر في الطبيعة بشكل حر ولكن على الأغلب يوجد بحالة سولفيد Sb_2S_3 أو أكسيد سولفيد وشكله بحالة سولفيد هو المصدر الرئيسي للمعدن [11،12].

يستخدم الأنتيموان في عدة مجالات من بينها : صناعة البطاريات، يدخل مع بعض المعادن لتكوين سبائك خليطة متميزة، ليُكسبها مزيداً من القساوة والمقاومة. ويستعمل الأنتيموان أيضاً في صنع مهابط الإصدار الضوئي المؤلفة من طبقة من أنتيموان السيزيوم $SbCs_3$. ويدخل الأنتيموان في تركيب الخلايا الناقلة للضوء ، والمكونة من بلورات أحادية من أنتيموان الأنديموم أو الغاليوم للكشف عن الأشعة تحت الحمراء. وتستعمل بعض مشتقات الأنتيموان العضوية في معالجة بعض الأمراض الطفيلية مثل داء الليشمانيات و داء البلهرسية و كذلك في صناعة عيدان الكبريت و أغلفة الكابلات الكهربائية [13] .

في مجال تقنية صناعة أنصاف النواقل، يمكن استعمال الأنتيموان كشوائب مانحة (مصدر للإلكترونات) لأن مدارها الأخير يمتلك إلكترونات حرة بعدما يشكل رابط تساهمية مع ذرات المادة المطعمة (السليكون، الجرمانيوم،....) ليسمح بالتوصيل الكهربائي و بالتالي يصبح لدينا في الأخير نصف ناقل من النوع السالب N. بحيث يتم إدخال الأنتيموان عن طريق ما يعرف بعملية الإشابة (التطعيم)

لغرض تحسين ناقلية نصف الناقل و يتم انجاز هذه العملية بإحدى الطريقتين : عملية الانتشار الحراري أو عملية الزرع الأيوني.

بالإضافة الى ذلك، فإن الأنتمون يتميز بأنه ضعيف الانتشار. فلذلك كان المرشح الذي يعوض الشوائب السابقة (الزرنينخ و الفوسفور) في صناعة n-MOSFET [15،14].

2-3 الزرنينخ :

عنصر الزرنينخ هو أحد العناصر الكيميائية الموجودة في الجدول الدوري ذو الرقم الذري "33" ، رمزه As. بعض الخصائص الكيميائية و الفيزيائية للزرنينخ ملخصة في الجدول (1).

الزرنينخ أحد أفراد عائلة النتروجين، وهو شبه معدن عديم الرائحة عديم المذاق، ويوجد بصورة طبيعية في الصخور والتربة. ويمكنه أن يتحد مع عناصر أخرى ليكون مركبات زرنينخية عضوية وغير عضوية، حيث تكون الأخيرة منها بوجه عام أكثر سمية وأكثر شيوعاً في المياه. لذلك تقول منظمة الصحة العالمية أن استهلاك مياه شرب تحتوي على الزرنينخ بنسبة تزيد على 10 مايكروغرام/ لتر لمدة طويلة من الزمن يمكن أن يؤدي إلى التسمم بالزرنينخ، والغغرينا (مرض مزمن يؤدي إلى اضطرابات جلدية) و سرطان الكلية والمثانة [17،16]. سمي هذا العنصر أيضا بإسم (سم المشاهير)، لاستخدامه كسم قاتل لكثير من الشخصيات التاريخية والمشاهير، نظرا لدرجة سميته العالية. بالرغم من ذلك، فقد قيل عنه أيضا بأنه سم و دواء حيث استخدمت مركبات الزرنينخ المختلفة في علاج الكثير من الأمراض منها الروماتيزم والأمراض التناسلية والسكري والربو والسل وغيرها. وفي دراسة حديثة قامت بها وكالة الفضاء الأمريكية ناسا، فقد عثروا على بكتيريا تتواجد في أعماق بحيرة (مونو ليك) المالحة في كاليفرنيا تتغذى على الزرنينخ وتحوله إلى بروتينات ودهون. إضافة إلى ما يعتبره العلماء العناصر الأساسية لتكوين الحياة ونموها مثل الكربون، الأكسجين، النيتروجين و الكبريت،

فيضاف إليها الزرنيخ كعنصر من عناصر بناء الكائن الحي [18] . أحيانا يوجد الزرنيخ على صورته النقية في الطبيعة، و لكنه في الغالب يوجد في مزيج كيميائي مع الكبريت أو الأكسجين، أو مع المعادن مثل الكوبالت، النحاس، الحديد، النيكل، الفضة والقصدير. المعدن الرئيسي الذي يحتوي على الزرنيخ هو الأرسينوبيريت، الذي يتكون من كبريتيد الحديد والزرنيخ. و أكثر مركبات الزرنيخ شيوعاً في الاستعمال هو الزرنيخ الأبيض، الذي يسمى أيضاً ثالث أكسيد الزرنيخ As_2O_3 و يتحصل عليه منتجاً جانبياً في العادة عند صهر النحاس أو الرصاص وهو من أخطر مركبات الزرنيخ [19] .

يوجد الزرنيخ في العديد من المصادر المتنوعة منها مبيدات الحشرات والقوارض والنباتات الطفيلية والدهانات وورق الحائط و في صناعة السيراميك و الزجاج كما يستعمل في تصنيع طلقات البنادق الرصاصية [20] .

أما في مجال تقنية صناعة أنصاف النواقل فيستخدم عنصر الزرنيخ كشوائب مانحة (مصدر للإلكترونات) لأن مدارها الأخير يمتلك الكترونات حرة بعدما يشكل رابطة تساهمية مع ذرات المادة المطعمة (السليكون، الجرمانيوم،.....) ليسمح بالتوصيل الكهربائي. بحيث يتم إدخال الزرنيخ عن طريق ما يعرف بعملية الإشابة (التطعيم) لغرض تحسين ناقلية نصف الناقل الذي يصبح من النوع السالب N.

العناصر			الخصائص
As	Sb	Si	
الزرنيخ	الأنتموان	السليكون	الإسم
33	51	14	العدد الذري
74.921	121.760	28.085	الكتلة الذرية (g/mol)
1.15	1.45	1.11	نصف قطر الذري (Å)
5.720	6.691	2.329	الكثافة (g/cm ³)
صلبة	صلبة	صلبة	الحالة الفيزيائية
8.78	8.64	8.15	طاقة التأين الأولى (eV)
333x10 ⁻⁹	417x10 ⁻⁹	2.3x10 ³	المقاومية (Wm) عند درجة حرارة (20°C)

الجدول (1): الخصائص الفيزيوكيميائية للعناصر Si ، Sb و As [23-21] .

3- التفاعلات أيون-مادة :

3-1 الخصائص المميزة للزرع الأيوني :

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 /cm² و 10^{18} ion /cm² [26-24,1].

لقد تم إدراج هذه التقنية في سنة 1951 عن طريق العالم شوكلي (Shockley) (أحد مخترعي الترانزيستور) لتحل محل العملية التقليدية (الانشار في درجة حرارة عالية) لتطعيم أنصاف النواقل [27]. 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 :

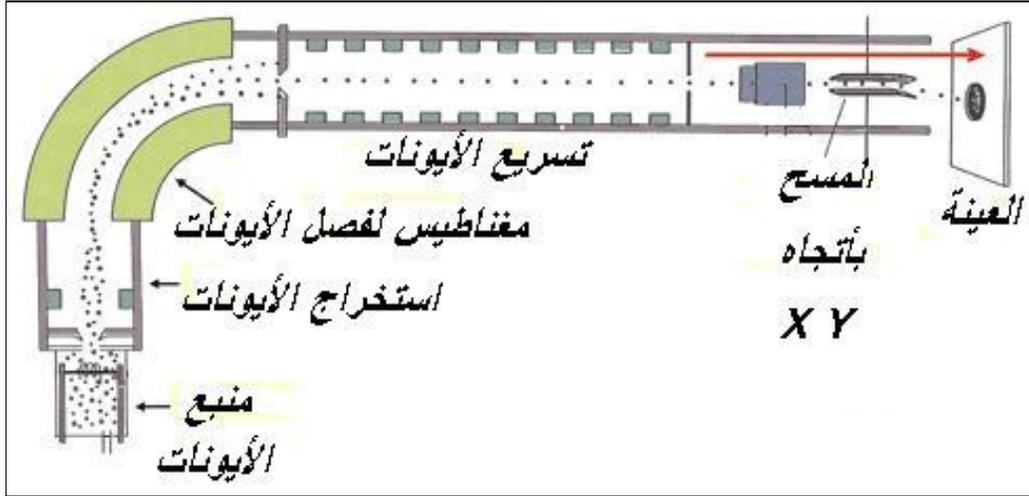
- مجال الالكترونات الدقيقة بحيث تم استخدامه من أجل تطعيم أنصاف النواقل و خاصة في صناعة ترونزيستورات JFET .

- 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 [28].

لإنجاز عملية الزرع نستعمل جهاز الزرع الأيوني [1]، الذي هو عبارة عن جهاز يوفر أيونات (شكل (2)). 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 الكترونات أولي يسمح باستخراج الأيونات. هذه الأخيرة تحتوي على كميات غير مهمة 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 التنبير و المسح من أجل ضمان تجانس الجرعة على مستوى العينة المستهدفة.



شكل (2): رسم توضيحي لجهاز الزرع الأيوني [1،29].

3-2 مزايا و عيوب تقنية الزرع الأيوني:

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

[30،1،27-32].

3-2-1 أهم المزايا الأساسية للزرع الأيوني :

- مراقبة دقيقة لعدد الأيونات و عمق اختراقها للمادة.
- يمكن تجاوز الحد الأقصى للذوبان إلى حد كبير.
- إمكانية إدخال عناصر غير قابلة للامتزاج مع الهدف.
- العوامل التي تدار بها هذه التقنية قليلة جداً، هي بكل بساطة يمكن استنساخها و مراقبتها بواسطة التيار الكهربائي و الجهد المطبقين.

- الطريقة تطبق عمليا على أي نوع من الركائز و أي نوع من الشوائب.
 - الكمية الإجمالية للأيونات الداخلة يمكن قياسها بسهولة.
 - يتم إجراء التقنية في درجة حرارة أقل مما عليه في تقنية الانتشار.
 - يمكن تطبيقها مباشرة على أجزاء رقيقة.
 - التغلغل الجانبي للأيونات في الركيزة محدود.
- 3-2-2 أهم العيوب الأساسية للزرع الأيوني :**

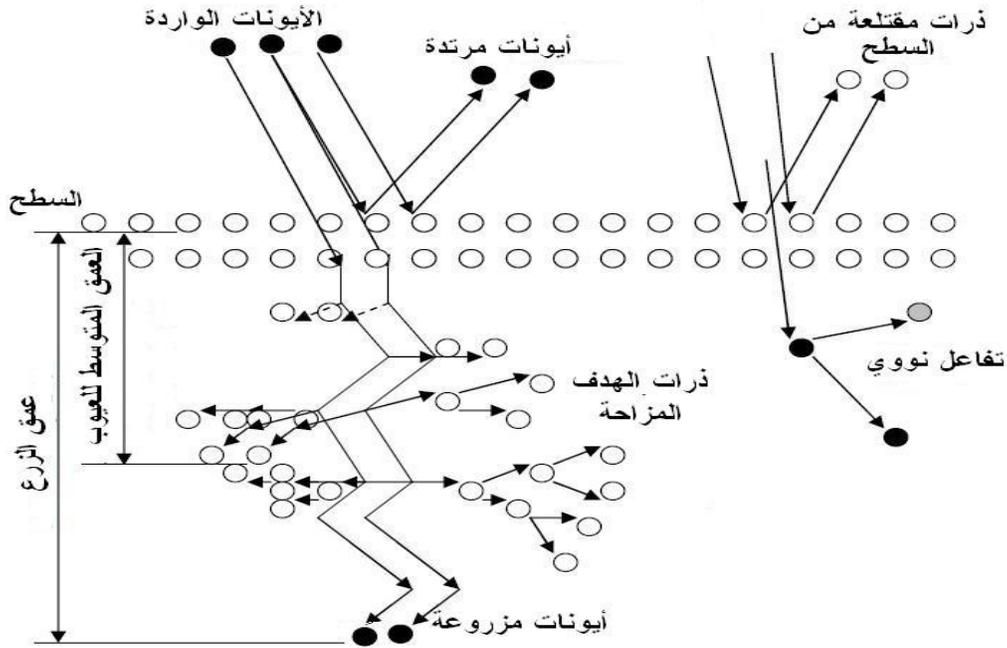
- الضرر الحتمي للشبكة البلورية الخاصة بالنصف الناقل و ذلك أثناء تباطؤ الأيونات بعد التصادم المتتالي مع ذرات الهدف.
- السطوح التي يتم معالجتها يجب أن تكون خارجية أو معرضة مباشرة لحزمة الأيونات.
- السمك الذي يتم معالجته يجب أن يكون منخفض ($1\mu\text{m}$).
- المعدات الخاصة بالتقنية مكلفة جدا وذلك حسب النموذج، بحيث سعر الجهاز الجديد يتراوح بين 3 مليون و 6 مليون دولار.

3-3 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)). 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)[33].



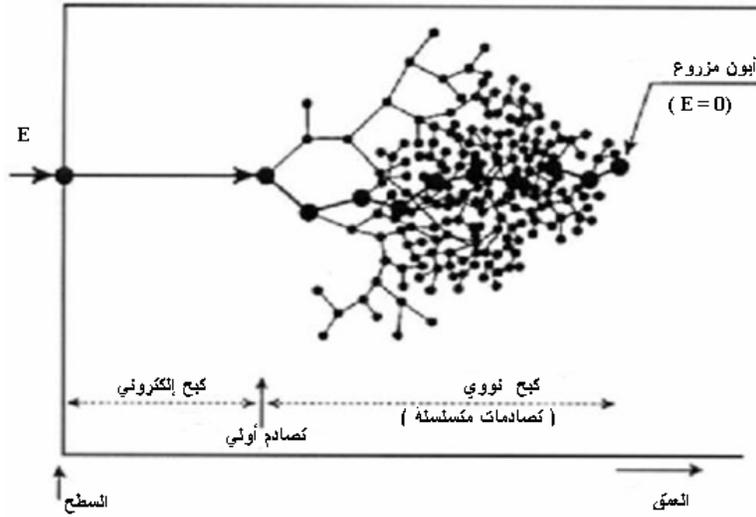
شكل(3): مختلف الظواهر التي يمكن أن تحدث أثناء الزرع الأيوني في المادة الصلبة [34].

فضلا عما سلف ذكره، فإنه من الواضح أيضا إمكانية حدوث ظواهر إضافية(الشكل (3)) 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 كالإلكترون، الفوتون، الجسيمات الخفيفة و/أو الثقيلة.
- و بالتالي كنتيجة حتمية، فإن الأيونات الواردة التي تتغلغل في المادة المستهدفة سوف تخضع لتفاعلات مع المادة حتى استنفاد طاقتها (الشكل(4)).



شكل (4): آلية الكبح لأيون أثناء زرعه في المادة الصلبة [35].

إن أحد العوامل الأساسية التي تلعب دورا هاما في نظريات توقف الأيونات في المادة هي فقدان الطاقة لكل وحدة عمق (بمعنى قدرة التوقف) و التي تترجم تناقص الطاقة الحركية أثناء تغلغل الأيونات في المادة.

في حالة مادة غير مبلورة و وفقا لنظرية LSS (Lindhard, Scharaff, Schiott) [37,36]، فإنه توجد عمليتان تصفان هذا الفقدان في الطاقة (الشكل(5)). بحيث تصبح أحد العمليتين مهيمنة مقارنة بالأخرى و ذلك اعتمادا على مجال الطاقة المستعملة و الكتلة الذرية للأيون.

و بالتالي تراكم العمليتين سوف يعطي قدرة التوقف الكلية $S(E)$ (الشكل (5)) التي تتناسب مع فقدان الطاقى للأيون و المتعلقة بالمسافة المقطوعة (dE/dX) . بحيث يمكن التعبير عن قدرة التوقف الكلية $S(E)$ على النحو التالي:

$$\left(\frac{dE}{dX}\right)_{tot} = \left(\frac{dE}{dX}\right)_e + \left(\frac{dE}{dX}\right)_n \quad (1)$$

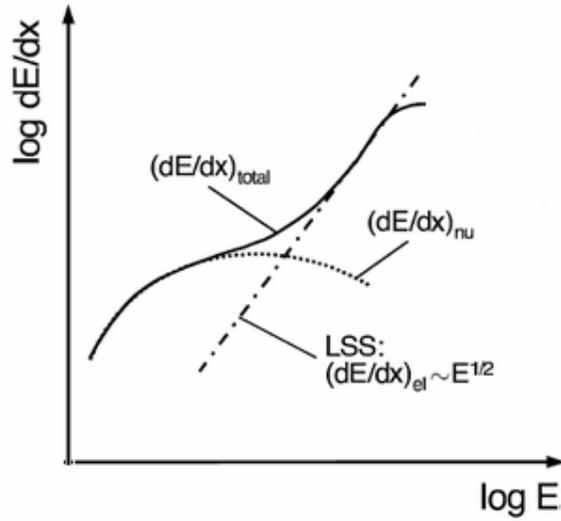
$$S(E) = \frac{1}{N} \left(\frac{dE}{dX}\right)_{tot} \quad (2) \quad \text{بحيث}$$

$$S(E) = S(E)_n + S(E)_e \quad (3) \quad \text{و منه}$$

$S(E)_n$: قدرة التوقف النووي، تترجم التصادم المرن المباشر للأيونات مع أنوية ذرات المادة (تكون ذات أهمية كبيرة في حالة الأيونات الثقيلة).

$S(E)_e$: قدرة التوقف الإلكتروني، تترجم التصادم الغير مرن للأيونات مع الموكب الإلكتروني لذرات الهدف.

N : التركيز الذري للهدف.



شكل (5): توضيح مكونات قدرة التوقف (النوية، الالكترونية و الكلية) بدلالة طاقة الأيون الوارد

(الشكل العام لهذه المنحنيات هو صالح من أجل أي أيون و أي مادة) [38].

1-3-3 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 :

$$S_n(E) = \frac{1}{N} \left(\frac{dE}{dX} \right)_n = \int T dS \quad (4)$$

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

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

في الميكانيك الكلاسيكية يعبر عن الطاقة المحولة T(p) في تصادم ثنائي مرن مع ذرة هدف في حالة

سكون بالعلاقة التالية :

$$T(p) = \frac{4M_1M_2}{(M_1+M_2)^2} E \sin^2\left(\frac{q(p)}{2}\right) \quad (5)$$

θ : زاوية الانتشار بين مسار الأيون و المحور X العمودي على سطح المادة المزروعة.

P : معامل التأثير و هو يمثل المسافة الأدنى بين مراكز الأنوية.

في نظرية LSS، الكمون المستعمل هو ناتج عن تأثير الحجب للالكترونات و ذلك حسب النموذج

الذري لـ طوماس-فيرمي. هذا الكمون يساوي جداء الكمون الكولومبي الكلاسيكي مع دالة الحجب.

بحيث يتم التعبير عنه بالعلاقة التالية:

$$V_{TF}(r) = \frac{Z_1Z_2e^2}{4pe_0r} f\left(\frac{r}{a}\right) \quad (6)$$

Z_1, Z_2 : هي الأعداد الذرية للذيفة و الهدف على التوالي.

V_{TF} : كمون طوماس-فيرمي.

$f\left(\frac{r}{a}\right)$: دالة الحجب التي تؤول إلى الواحد عندما r يتناقص.

r : مسافة التفاعل.

a : نصف قطر الحجب يقدر من طرف بور انطلاقا من النموذج الذري لطوماس-فيرمي بالعلاقة

التالية :

$$a = \frac{0.8853 a_0}{\sqrt{Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}}} \quad (7)$$

a_0 : نصف قطر بور لأدنى مدار خاص بذرة الهروجين، تقدر قيمته بـ 0.529 \AA .

يتم أخيراً حساب قدرة التوقف النووي $S(E)_n$ للجسيم الوارد من خلال تكامل $T(p)$ و $d\sigma$ على المسار المسلوک.

3-3-2 قدرة التوقف الإلكتروني :

يعبر عن التباطؤ الإلكتروني الناتج عن التصادمات الإلكترونية بين الأيونات الواردة و الإلكترونات المرتبطة بأنوية الذرات بواسطة قدرة التوقف الإلكتروني و التي تكون جد مهمة في مجال الطاقات العالية. فحسب نموذج LSS في مجال الزرع الأیوني، تكون قدرة التوقف الإلكتروني متناسبة مع سرعة الأيون الوارد و تكتب على النحو التالي:

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

كذلك توجد علاقة أخرى من الشكل:

$$S_e = K E^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

D : الكثافة الإلكترونية للهدف.

a_0, V_0 : سرعة و نصف قطر بوهر على التوالي.

E, V : سرعة و طاقة الأيون على التوالي.

K : ثابت، قيمته النظرية تم حسابها من قبل Lindhard et all [39].

4- توزيع الأيونات المزروعة :

توزيع الأيونات في المادة بعد عملية الزرع حسب نظرية LSS المفروضة بالنسبة لجسم صلب غير مبلور يكون ذو نوع غوسي [39،36،1]. هذا التوزيع يعبر عنه بدالة توزيع من الشكل :

$$n(x) = n_0 \exp\left(\frac{-(x - R_p)^2}{2(\Delta R_p)^2}\right) \quad (10)$$

$$n_0 = \frac{f}{\sqrt{2p} \Delta R_p} \quad (11)$$

تتميز دالة التوزيع الغوسي بعزمين هما (الشكل(6)):

- مسقط المسار المتوسط R_p بصفته العمق الذي تتوقف فيه الأيونات المزروعة بتركيز أعظمي.
و يتم التعبير عنه كالتالي :

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

Φ : الجرعة الكلية المزروعة تقدر ب (ions/cm²).

$n(x)$: توزيع كل الأيونات المزروعة في العمق.

- الانحراف المعياري المتوسط ΔR_p الذي يميز التوزيع الإحصائي للأيونات في العمق و ذلك حول R_p .

$$\Delta R_p^2 = \frac{1}{\Phi} \int (x - R_p)^2 N(x) dx \quad (13)$$

بحيث قيمتي R_p و ΔR_p تحددان بحسب نوع الأيون المزروع و طاقته [1].

في حالة توزيع من نوع Pearson-IV [40] يضاف عزمين آخرين لدالة التوزيع و هما (الشكل(7)):

- الانحراف(الميلان) γ (Skewness) الذي يقيس عدم التناظر للتوزيع أو تموقع قمة المنحنى مقارنة مع R_p ، في حالة التوزيع الغوسي γ بالتقريب تساوي 0 [41،40].

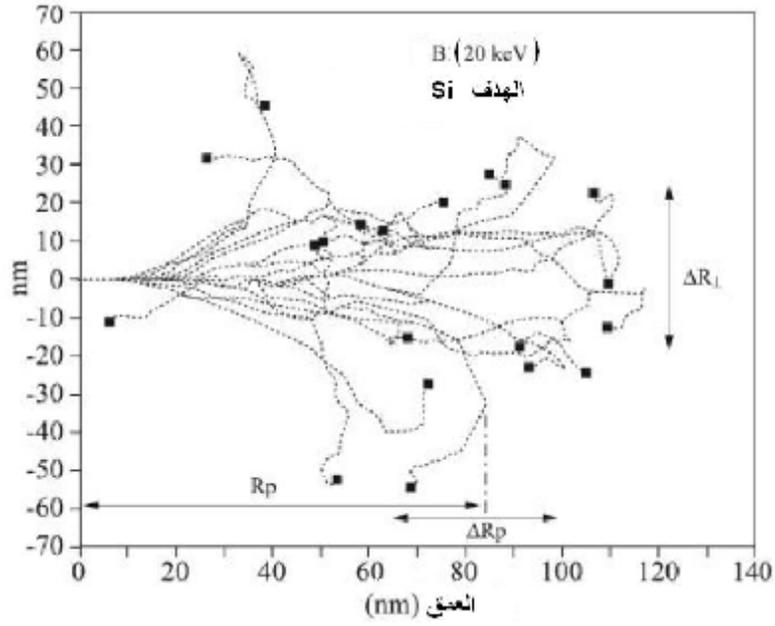
$$g = \frac{1}{\Phi \Delta R_p^3} \int_0^{+\infty} (x - R_p)^3 N(x) dx \quad (14)$$

- التفرطح β (Kurtosis) الذي يقيس سحق ذروة المنحنى (كذلك تمديد الذيل للتوزيع في الحجم)،

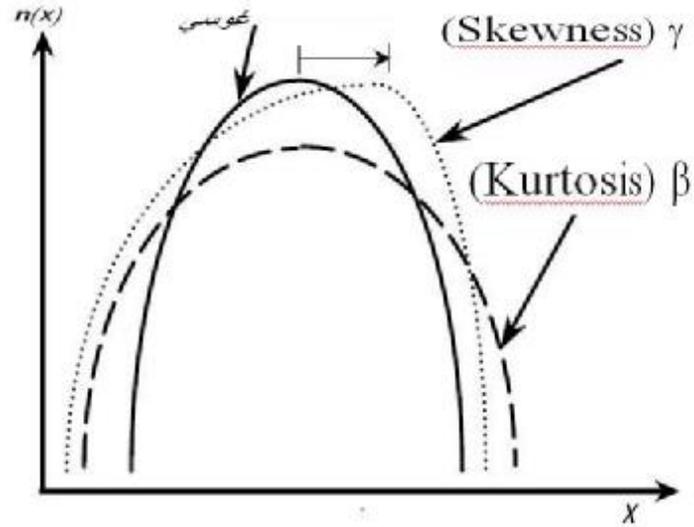
في حالة التوزيع الغوسي β بالتقريب تساوي 3 [41،40].

$$b = \frac{1}{\Phi \Delta R_p^4} \int_0^{+\infty} (x - R_p)^4 N(x) dx \quad (15)$$

يوجد معامل فيزيائي آخر يميز التشتت الجانبي للأيونات و الذي لا يمكن تجنبه و هو يدعى بالانحراف الجانبي و يرمز له بالرمز ΔR_{\perp} (الشكل(6)). هذا المعامل جد هام خاصة في حالة استعمال القناع (لمنع الزرع في المناطق غير المطلوب إشتابها و هو عبارة عن طبقة رقيقة من أكسيد السليكون SiO_2 أو نيتريد السليكون Si_3N_4 و أحيانا من الألمنيوم [1]) من أجل تصميم المركبات الالكترونية.



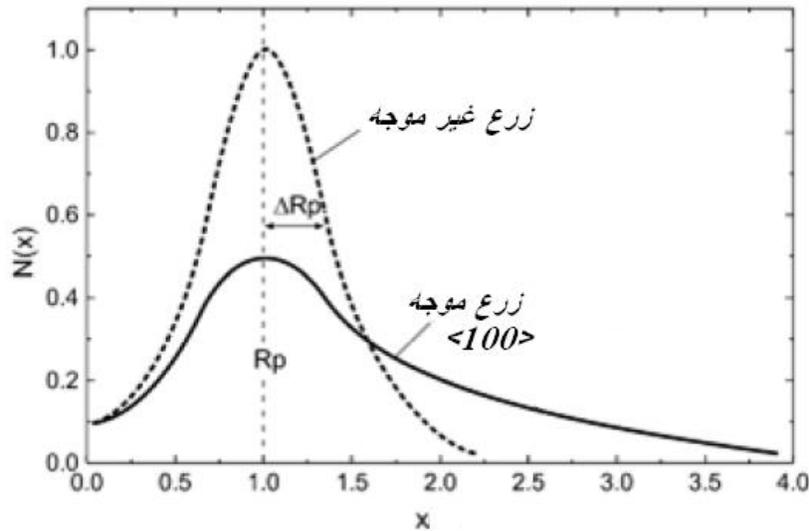
الشكل (6): مسار عشرون أيون من البور ذو طاقة 20KeV في هدف من السليكون [42].



الشكل (7): رسم بياني يبين العزمين γ و β بالنسبة للتوزيع الغوسي [40].

5- أثر الاستثناء على الأيونات المزروعة :

تمتلك المواد أحادية التبلور هيكل متباين الخواص، حيث يمكن لتأثير الاتجاهات أن تلعب دورا مهما عند الزرع الأيوني و ذلك لما لها من تأثير غير مهمل على قدرة التوقف. فعندما يكون أيون وارد (من حزمة أيونات واردة) مواز (موجه) لصف بلوري، فإنه سوف يصد تدريجيا من قبل ذرات الصف البلوري التي تظهر على شكل مجموعة انحرافات متتالية و مرتبطة باتجاه الصف أو المستوي البلوري المجاور. بهذه الطريقة، الأيون يتمركز و يوجه في القناة و ذلك بين مستويين أو تبعا لمحور بلوري. و بالتالي سوف يكون مسار الأيونات في العمق أكبر مقارنة بحالة هدف غير مبلور (الشكل(8)). عمليا، في الأهداف أحادية التبلور تكون على العموم غير موجهة مقارنة مع محور الحزمة الأيونية بزاوية تقدر بـ 7° من أجل منع استثناء (التوجيه باتجاه محور بلوري) الأيونات [26،43].

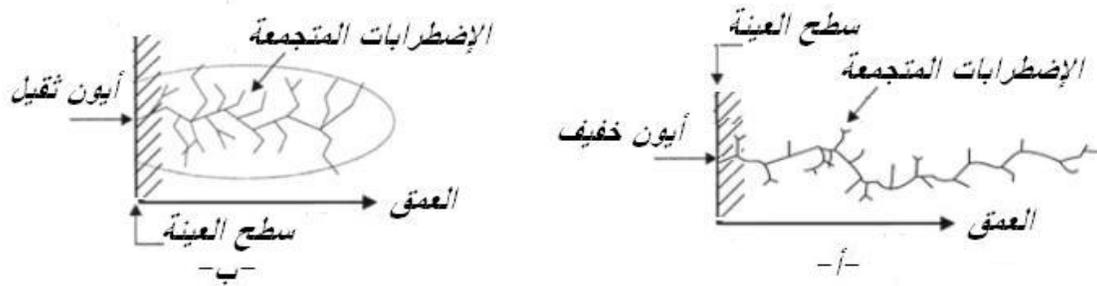


الشكل(8): رسم بياني يوضح توزيع ذرات الزرنيخ As (100keV) المزروعة في Si. المنحنى

المتقطع حالة الزرع غير الموجه، أما المنحنى المستمر حالة زرع موجه باتجاه <100> [26].

6- توزيع العيوب في المادة بعد عملية الزرع :

إن التصادمات النووية هي وحدها المسؤولة عن خلق العيوب، فإما أن تكون ناتجة عن تصادمات أولية مع الأيونات الواردة و إما نتيجة لتصادمات ثانوية مع ذرات الهدف المتحركة بسبب تصادم أولي أو ثانوي [44]. و بالتالي، إذا أردنا تحديد كمية الضرر الناتج عن الأيونات المزروعة بنوعيتها الخفيف و الثقيل (الشكل (9))، نقول بأن هذه الأخيرة تخترق العينة إلى مسافات صغيرة. حيث تحدث عيوباً موضعية كبيرة فيها و تكون أقرب إلى السطح مقارنة بالأيونات الخفيفة [45]، و تسمى هذه الطبقة بالمنطقة اللابلورية.



الشكل (9): رسم توضيحي يبين الضرر الناجم عن زرع أيونات في عينة، (أ) - أيون خفيف، (ب) -

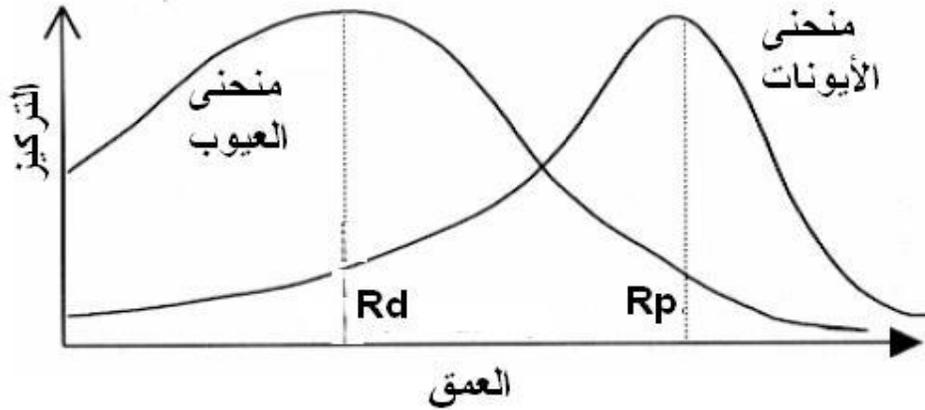
أيون ثقيل [45].

العيوب التي نشأت عن طريق الزرع الأيوني هي عيوب نقطية. في الحقيقة، هي لا تتعلق إلا باضطرابات موضعية على المستوى الذري [1]. أغلب العيوب التي خلقت عن طريق الزرع الأيوني هي أزواج فرنكل (زوج انغراسي + فجوة) [44،46]. لكن كثير من هذه الأزواج تلغى فوراً بسبب تواجد ذرة إنغراسية بجوار فجوة، وبالتالي البنية البلورية للعينة لا يتم تهديمها كلياً بعد الزرع الأيوني [44]. ومع ذلك، لا تزال هناك العديد من العيوب بحيث عدد العيوب الموجودة في العينة بعد

الزرع يعتمد على سرعة إنشاء العيوب (الجرعة المزروعة، شدة الشعاع الأيوني، عمق الاختراق للأيونات) وسرعة الانتشار لأزواج فرنكل في هذه المادة.

في الأخير، سوف يكون توزيع العيوب في العينة بدلالة العمق مختلفا كثيرا عن توزيع الأيونات المزروعة (الشكل (10)). لذلك سوف نجد بأن توزيع العيوب يكون في أعماق أصغر (قريب من السطح)، و المنطقة التي يتم فيها إنشاء العيوب بين سطح العينة والحد الأقصى للزرع R_p تسمى "منطقة التصادمات المتسلسلة".

لكي نتمكن من استعمال العينة في مجال أنصاف النواقل، يجب إخضاعها لمعالجة حرارية لغرض إصلاح هذه العيوب الناتجة عن الزرع و جعل الأيونات المزروعة تحتل مواقع احلالية لكي تكون نشطة [47،1].



الشكل (10): توزيع العيوب و الأيونات بدلالة العمق [35].

7- البرامج المستعملة لمحاكاة ظاهرة الزرع الأيوني :

لقد تم تطوير، منذ 1960، طرق للمحاكات الحاسوبية من أجل حساب مسارات الأيونات في المواد الصلبة [48]. حيث كانت الفكرة الأساسية فيها هي إتباع حركة الأيونات في الوسط عن طريق محاكاة التصادمات مع نواة الهدف. عادة، تأخذ في الحسبان قدرة التوقف الإلكتروني بوصفها قوة احتكاك لإبطاء الأيون.

تستند الطرق التقليدية المستخدمة في المحاكاة الحاسوبية للذرة الطاقية مع الأهداف الصلبة إلى تقريب التصادمات الثنائية **BCA** (Binary Collision Approximation) [49-51]. في هذه الطرق يتم التعامل مع حركة الأيونات في العينة المزروعة باعتبارها 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.

7-1 برنامج **SRIM** (Stopping and Range of Ions in Matter) :

هو اختصار لـ توقف و مسار الأيونات في المادة. تم إنشائه من طرف زيقلر، بيرسك و ليتمارك و ذلك في سنة 1985 باستعمال طريقة مونت كارلو (هي عبارة عن مجموعة خوارزمات حسابية تستعمل لحساب قيم عددية تقريبية و ذلك بتكرار التجربة بقيم عشوائية) التي تحاكي عبور الأيونات في مادة غير مبلورة مع استنادهم على تقريب التصادمات الثنائية [52،53]. هذا البرنامج يحتوي على مجموعة من برامج تحسب العديد من المميزات لنقل الأيونات في المادة الغير مبلورة. وتشمل التطبيقات النموذجية التالية [54] :

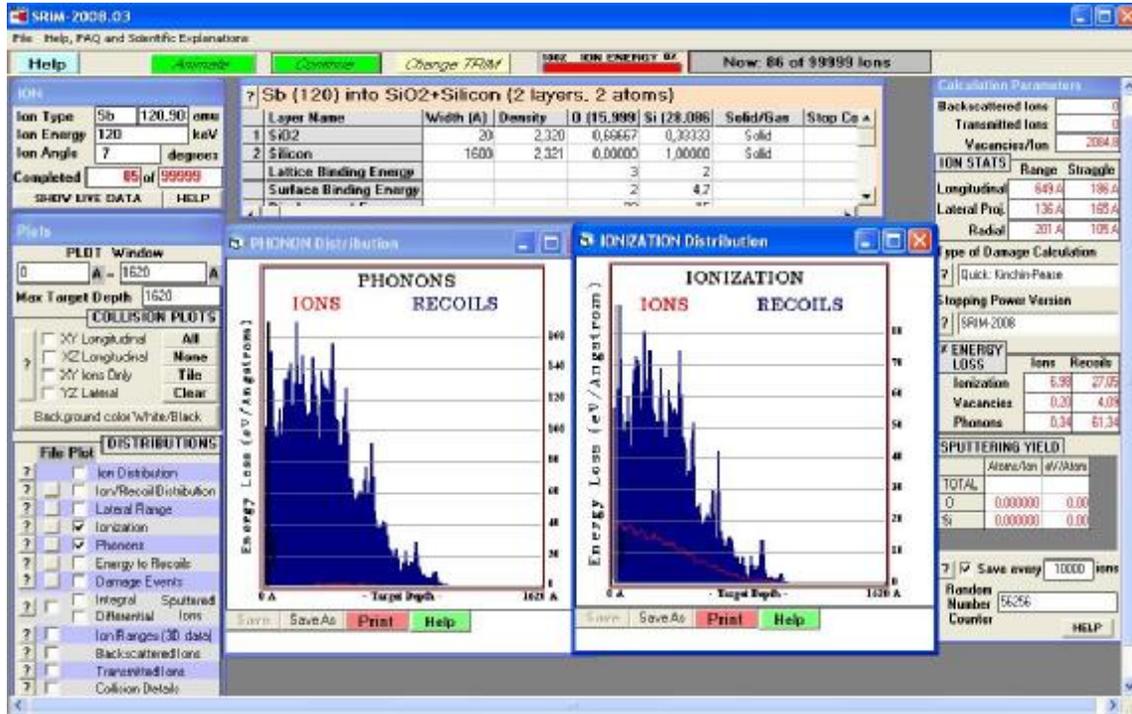
- توقف و مسار الايون في الهدف : يقوم بحساب فقدان الطاقة للأيونات في المادة (الشكل (11))، حيث يشمل حسابات سريعة تنتج جداول لقدرة التوقف، المسار و التوزيع الإنحرافي لأيون وبأي طاقة و في أي هدف. كما يعطي عمليات حسابية أكثر تفصيلا تشمل أهداف بتكوينات متعددة الطبقات و معقدة.

- الزرع الأيوني : يحاكي عملية الزرع الأيوني (الشكل (12))، بحيث يستخدم فيها حزم أيونية لغرض حقنها في المادة المستهدفة من أجل تعديل أو تغيير الخصائص الكيميائية والالكترونية للمادة. هذه المحاكاة تعطي لنا أهم معاملات الزرع الأيوني مثل R_p ، ΔR_p و ΔR_{\perp} الخاصة بتوزيع الأيونات داخل الهدف. كما تظهر لنا أهم الظواهر الفيزيائية التي تحدث أثناء التفاعلات بين الحزمة الأيونية الواردة و ذرات المادة المستهدفة و ذلك بإعطاء توزيعها بدلالة عمق الزرع. من بين هذه الظواهر: تأين الأيونات و الذرات المستهدفة، خلق الفجوات، الفونونات، الأيونات المرتدة و الذرات المقتلعة. كما يمكن أن يتعامل هذا البرنامج مع مادة مستهدفة حالتها الفيزيائية غازية.



الشكل (11): واجهة التطبيق المتضمنة في حزمة SRIM الخاصة بحساب فقدان الطاقة للأيونات في

المادة.



الشكل (12): واجهة التطبيق المتضمنة في حزمة SRIM الخاصة بمحاكاة زرع الأيونات في المادة الغير مبلورة.

تم اختيار برنامج SRIM لمحاكاة و التنبأ بمختلف الظواهر التي تحدث عند تفاعل أيونات الانتموان و الزرنينخ مع السليكون. اختيارنا كان مبررا لأن العينة المستعملة كانت موجهة بالنسبة لحزمة أيونات الانتموان (كذلك بالنسبة للزرنينخ) الواردة بزاوية مقدارها 7° وذلك خلال الزرع الأيوني. و بهذه الطريقة وبالرغم من أن العينة مبلورة سوف ينظر إليها على أنها غير مبلورة [26]. برنامج SRIM يركز على برنامج TRIM (انتقال الايونات في المادة) وهو يشتغل على الوندوز و يعتبر تطوير لـ TRIM الذي يشتغل على الدوس (DOS).

هذا البرنامج يسمح بمحاكاة توقف و مسار الأيونات في المادة خلال المجال الطاقى (2GeV/amu-10eV) [54]. حيث يفرض بأن المقطع الفعال للتصادمات بين الأيونات و ذرات

الهدف معرف بواسطة كمون كولومبي للحجب ذو نوع ZBL (Ziegler,Biersack,Lindhard).

يكتب هذا الكمون على الشكل التالي [52] :

$$U_{ZBL}(r) = \frac{1}{4\pi e_0} \frac{Z_{ion} Z_{atome} e^2}{r} f_u \left(\frac{r}{a_u} \right) \quad (16)$$

$$a_u = \frac{0.8854 a_0}{Z_{ion}^{0.23} + Z_{atome}^{0.23}} \quad (17)$$

$$f_u \left(\frac{r}{a_u} \right) = 0.1818 e^{-3.2 \frac{r}{a}} + 0.5099 e^{-0.9423 \frac{r}{a}} + 0.2802 e^{-0.4029 \frac{r}{a}} + 0.02817 e^{-0.2016 \frac{r}{a}} \quad (18)$$

برنامج SRIM يعمل حسابات مفصلة تخص الطاقة المحولة لذرات الهدف من أجل كل تصادم. و ذلك باستخدامه طريقة سلسلة الاصطدامات لمتابعة الذرات الفردية المرتردة التي تصبح بدورها قذائف. و بالتالي سوف يتكرر نفس الإجراء من أجل كل الذرات المرتردة ذات الرتبة الأعلى مشاركة في سلسلة التصادمات. هذه المتابعة يمكن أن تواجه أربعة حالات مختلفة ولكن سوف تتوقف لما تصبح الذرات تمتلك طاقة أقل من الطاقة E_d (الطاقة الأدنى التي يجب تحويلها للذرة الهدف من أجل إزاحتها من موقعها و خلق فجوة). نأخذ E_{ion} و E_{atome} هما طاقة الأيون بعد التصادم و الطاقة المحولة إلى الذرة الهدف على التوالي [52،53].

$E_{ion} > E_d$ و $E_{atome} > E_d - 1$: في هذه الحالة، الأيون الوارد يستطيع إزاحة ذرة الهدف و التي

تحدث بدورها تصادمات متسلسلة بين ذرات الهدف فينتج عنها ظهور فجوات.

2 - $E_{\text{atome}} < E_d$ و $E_{\text{ion}} > E_d$: في هذه الحالة، طاقة الأيون الوارد بعد التصادم كافية لإزاحة ذرات الهدف من مواقعها. أما طاقة الذرة المزاحة من طرف الأيون الوارد فهي غير كافية، و بالتالي لا يمكنها إزاحة ذرات أخرى، لذلك سوف تنبدد طاقتها على شكل فونونات (اهتزازات الشبكة).

3 - $E_{\text{atome}} > E_d$ و $E_{\text{ion}} < E_d$: في هذه الحالة، الذرة الهدف تزاح من موقعها و تصبح جسيم وارد لإحداث تصادمات أخرى. أما بالنسبة للجسيم الوارد فسوف يحتل موقع إجلالي و طاقته تنبدد في الشبكة عن طريق اهتزازات (الفونونات).

4 - $E_{\text{atome}} < E_d$ و $E_{\text{ion}} < E_d$: في هذه الحالة، طاقة الأيون الوارد بعد التصادم غير كافية لإزاحة ذرات الهدف من مواقعها، لذلك سوف يحتل مواقع انغراسية فقط وأما طاقته المتبقية تنبدد في الشبكة على شكل فونونات. بالنسبة للذرة الهدف سوف تستمر بالاهتزاز في موقعها في توازن دون ترك مكانها.

2-7 برنامج CRYSTAL-TRIM :

لقد تم إنشاء هذا البرنامج الذي يعتمد على مبدأ التصادم الثنائي، من طرف ماتياس بوسالت سنة 1991 (الشكل (13)). كان ذلك في معهد حزمة الأيونات الفيزيائية و أبحاث المواد بألمانية [55]. و ذلك لغرض محاكاة أثر زرع الأيونات في المادة الصلبة أحادية التبلور مثل السليكون، الجرمانيوم والماس في حالة التوجيه العشوائي و الموجه باتجاه القناة، مع الأخذ في الحسبان الاهتزازات الحرارية لذرات الهدف. و بالتالي هذا البرنامج سوف يسمح بمراقبة دقيقة لحركة الأيونات و ارتداد ذرات الهدف. النموذج الذي يعتمد عليه هذا البرنامج هو نموذج التوقف الإلكتروني لـ أوان و روبينسون [56] و الذي يتوافق مع البيانات التجريبية [57]. حيث وجد بأن هناك توافق تام بين محاكاة الزرع الأيوني

لأيونات البور في هدف من السليكون (100) مع النتائج التجريبية المحصل عليها بواسطة تقنية

SIMS (La spectrométrie de masse à ionisation secondaire) [58].

يعتمد برنامج C-TRIM في دراسته لنظرية التصادم الثنائي على عدة فرضيات من بينها [59] :

- إهمال أي تغيير في تركيب الهدف أثناء الزرع الأيوني.

- تكون ذرات الهدف في حالة سكون قبل أي اصطدام مع القذيفة.

- لا يأخذ بعين الاعتبار إلا حركة الأيونات (حركة ذرات الهدف المرتدة لا يتابعها).

بالإضافة إلى ذلك، فإن معالجة التصادمات الثنائية في هذا البرنامج توصف بالانتشار النووي وفقدان

الطاقة لتفاعل تنافري بين ذرتين و ذلك باستعمال الكمون العام بين الذرات و المعبر عنه في المعادلة

(6) [52]. تفيد تقارير بأن الكمون العام هو تقريب دقيق للعديد من الحالات قذيفة-هدف [52].

إن الطاقة T_n المحولة من القذيفة إلى النرة الأولية المصدومة هي من ناحية أخرى سوف تحول إلى

ارتداد ثانوي في سلسلة من الاصطدامات. يتم الحصول على تراكم الطاقة النووية في اصطدام قذيفة

مع ذرة الهدف بالعلاقة التالية :

$$E_n = \frac{T_n}{1 + 0.1334 \left(Z_2^{2/3} / m_2^{1/2} \right) g(e_d)} \quad (19)$$

$$g(e_d) = e_d + 0.4 e_d^{3/4} + 3.4 e_d^{1/6} \quad (20)$$

$$e_d = 0.01 \left(T_n / Z_2^{7/3} \right) \quad (21) \quad \text{حيث :}$$

حيث تراكم الطاقة الالكترونية يعطى بالصيغة التالية:

$$E_{el} = \Delta E_{el} + T_n - E_n \quad (22)$$

ΔE_{el} : ضياع الطاقة الالكترونية.

انطلاقاً من E_n ، عدد الإزاحة N_d يحسب باستعمال نموذج Kinchin-Pease [60].

$$N_d = 1 \quad \text{إذا كان} \quad E_d \leq E_n < 2.5E_d \quad (23)$$

$$N_d = 0.4(E_n / E_d) \quad \text{إذا كان} \quad E_n \geq 2.5E_d \quad (24)$$

حيث E_d تساوي قيمتها 15eV بالنسبة للسليكون [59].

لتحديد أثر الضرر، يأخذ المجال $(X, X+\Delta X)$ الذي هو جزء من عمق الهدف، بحيث يتم تحديد

احتمال P_v أن يكون موقع في الشبكة محتلاً من قبل فجوة و ذلك بواسطة تركيز الإزاحة في هذا

المجال مقسوم على التركيز الذري n في البلورة.

$$P_v = \frac{1}{n} \left(\frac{N_d D_0}{\Delta X N} \right) \quad (25)$$

D_0 : الجرعة التجريبية.

N : عدد القذائف الافتراضي في المحاكاة.

N_d : عدد الإزاحة الناتج عن أول قذيفة افتراضية في عمق المجال.

n : التركيز الذري للبلورة.

من خصائص هذا البرنامج أيضا، أنه يستطيع محاكاة عملية الزرع الأيوني لأيونات ذرية و كذلك أيونات جزيئية (أقل من ثلاثة عناصر). حيث تصل هذه العملية إلى 10 طبقات فوقية غير متبلورة و عشوائية التركيب (تصل إلى حد ثلاثة عناصر) ، التطبيقات الأساسية للبرنامج كانت محققة من أجل آثار الاستقناء و تطور العيوب أثناء قذف الأيونات [55]. النسخة الحالية تستخدم أساسا لحساب مدى الزرع و توزيعات الضرر بدلالة العمق.

```

C:\ Invite de commandes - xtru04
D:\Crystal>xtru04
*****
* Crystal-TRIM (04/1D (May 2004)) *
* developed by Matthias Posselt *
* *
* <C> 1991,1992,1993,1994,1995,1996,1997,*
* 1998,1999,2000,2001,2002,2003,2004 *
* Matthias Posselt *
* Forschungszentrum Rossendorf *
* Institute of Ion Beam Physics and *
* Materials Research *
* P.O.Box 510119, D-01314 Dresden, Germany*
* Tel.: +49 351 260 3279 *
* FAX: +49 351 260 3285 *
* E-mail: posselt@fz-rossendorf.de *
*****

Standard Version - Input Dialog

File names consist of a variable first part
which contains (exactly!) 4 ASCII characters
and a constant second part.
Name of the first part?(a4, exactly 4 ASCII characters?)
    
```

الشكل (13): واجهة برنامج CRYSTAL-TRIM الخاصة بمحاكاة زرع الأيونات في المادة

المبلورة.

8- خاتمة جزئية:

في سياق هذا الفصل، قمنا بعرض نظرة عامة عن التفاعلات أيون-مادة أثناء استعمال تقنية الزرع الأيوني، 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 الاستثناء 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، أما الثاني فهو C-TRIM الذي يحاكي زرع الأيونات في هدف مبلور.

الفصل الثاني

تقنيات التحليل التجريبي

1 - مقدمة:

في هذا الفصل، تتمحور فكرتنا حول إعطاء نظرة عامة عن كل التقنيات التجريبية المستعملة من أجل تحليل العينات. في أول الأمر سنقدم لمحة عن تقنية RBS التجريبية المستعملة من أجل تحليل مجموعة من العينات. بحيث نقوم بإعطاء نظرة عامة حول المبدأ الفيزيائي لهذه التقنية في حالة استعمال الهندستين العشوائية و الموجهة. بعد ذلك نتطرق إلى مطيافية انعراج الأشعة السينية (DRX)، ثم ننتقل لحالة مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR)، و في الأخير سوف ننتهي بتقنية مطيافية التآلق الضوئي (PL) دون أن ننسى تقنية الأربع نقاط لقياس المقاومة (quatre pointes).

2- مطيافية الانتشار الارتدادي لروذرفورد RBS :

تستخدم طريقة RBS (la Spectroscopie de Rétrodiffusion Rutherford) على نطاق واسع في علوم المواد وخاصة في أشباه الموصلات [61] ، فهي تنتمي إلى التقنيات المصنفة تحت المصطلح العام للمطيافية الأيونية. ينسب اسم هذه التقنية إلى العالم لورد ارنست روذرفورد الذي هو أول من أدخل التصور النووي للذرات و الانتشار على الأنوية و ذلك في سنة 1903 [62]. ترتكز هذه التقنية على قذف سطح الجسم الصلب بواسطة حزمة أيونات طاقية، يتم من خلالها إحداث تفاعلات على مستوى النواة و الذرة. بعد ذلك يتم حساب عدد القذائف المرتدة عندما تصد من قبل الحقل الكهربائي لأنوية الهدف الخاصة بالعينة. هذا التقدير يكون على مستوى كواشف قادرة على حساب القذائف المرتدة و قياس طاقتها الارتدادية بحيث تكون مجهزة بزواوية انتشار يتم اختيارها عموما في نطاق 150-170 درجة مقارنة باتجاه الحزمة. من جهة اخرى، الحزمة الأيونية المستخدمة تتكون على العموم من جسيمات He^+ أو H^+ و عادة تكون خاضعة لطاقة تتراوح بين 1MeV

و 3MeV [62]. تستند هذه الطريقة إلى مبدأي انحفاظ الطاقة الحركية و كمية الحركة للنظام قذيفة-هدف، حيث يتم ذلك انطلاقاً من التحليل الطاقى للجسيمات المرتدة بواسطة التفاعل المرن مع ذرات الهدف.

3- مزايا و عيوب تقنية RBS :

مثل كل التقنيات التجريبية، تقنية RBS تمتلك مزايا و عيوب على حد سواء [62].

3-1 أهم مزايا هذه التقنية :

- تقنية سريعة و غير هدامة للعينة المستهدفة.
- توفر معلومات عن الحالة البلورية للعينة.
- يسمح بقياس جرة الشوائب و الحصول على توزيعها في عمق الهدف.
- تسمح بتحديد سمك و تركيب مختلف الطبقات المكونة للهدف.
- تمتلك درجة وضوح جيدة للعمق (10 nm ~).

- حساسية جيدة للعناصر الثقيلة.

- حساسية عالية لعيوب البلورات.

3-2 أهم حدود هذه التقنية :

- تركيب التقنية مكلف جداً.

- تحتاج إلى مسرع.

- تحليل العينات السميكة محدود.

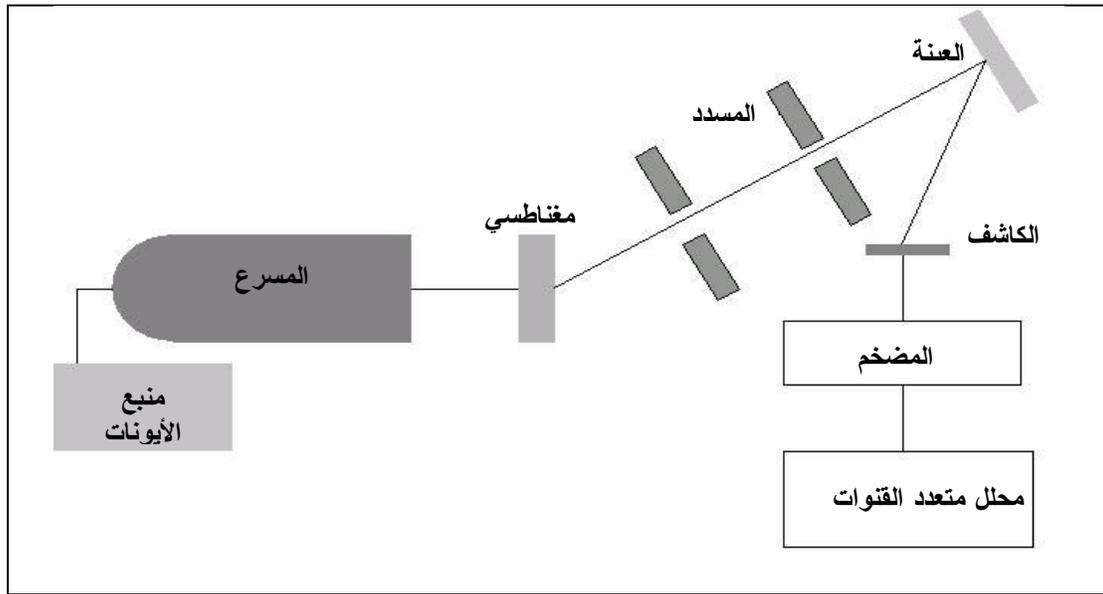
- لا تمتلك درجة وضوح جيدة في الكتلة للعناصر الخفيفة بالنسبة للماساند الثقيلة.

- دقة وضوح جانبية ضعيفة.

4- الجهاز التجريبي :

يتألف الجهاز المبين في الشكل (14) من منبع للأيونات بحيث يصدر جسيمات مشحونة من نوع H^+ أو He^+ . يتم تضخيم طاقة هذه الجسيمات بواسطة مسرع (عموماً من نوع Van De Graaf) مع جهد أعظمي يكون من عدة MeV [62]. هناك مغناطيس متبوع بشق الاستقرار من أجل السماح بالحصول على حزمة من الجسيمات أحادية الطاقة خالية من أي حزم أيونية دخيلة.

المسدات تسمح بضبط حجم قطر حزمة الجسيمات من 1 nm إلى 10 nm. كما أنها تسمح بقيادة الأيونات في غرفة RBS المحفوظة تحت الفراغ ($\sim 10^{-6}$ Torr). في هذه الغرفة يكون الهدف محمول فوق مقياس الزوايا 3D، يستخدم لمراقبة اتجاهها بالنسبة لحزمة الجسيمات المشحونة. الكاشف ذو الحاجز السطحي يسمح بجمع الأيونات المرتدة بواسطة الهدف و حسابها بدلالة طاقتها. في الأخير يتم تضخيم الإشارة المتحصل عليها و معالجتها بسرعة بواسطة جهاز الكتروني تماثلي و رقمي ثم إرسالها نحو الحاسوب للحصول على البيانات.



الشكل (14): الجهاز الخاص بتقنية RBS [63].

5- المبدأ الفيزيائي لتقنية RBS :

ترتكز هذه الطريقة على التحليل الطاقوي للجسيمات المرتدة الناتجة عن التفاعلات الكولمبية المرنة بين

الأنوية المقذوفة و ذرات العينة [62]. بحيث يتم استعمال أربعة تصورات فيزيائية و هي تتعلق بـ:

- عامل الحركة الذي يمثل التحويل الطاقوي لجسيم وارد نحو نواة الهدف عند التصادم المرن بين جسيمين.

- المقطع الفعال الذي يمثل احتمال تكوين أيون وارد مرتد للخلف.

- قدرة التوقف التي تمثل فقدان الطاقة أثناء اختراق الأيون للعينة.

- التشتت الإحصائي في ضياع الطاقة (اسمه الشائع straggling).

5-1 عامل الحركة K (عامل الانتشار) :

عندما أيون (ذو كتلة M_1 و شحنة Z_1 و طاقة E_0) يتفاعل مع نواة (ذات كتلة M_2 و شحنة Z_2) فإنه ينتشر بمرونة في الاتجاه θ بطاقة E_1 أقل من طاقته الابتدائية E_0 و ذلك بسبب التفاعلات الكولمبية بين أنوية الذرات (الشكل(15)).

وفقا لمبدأ انحفاظ الطاقة و كمية الحركة، بعد التصادم الطاقة E_1 للجسيم الوارد يمكن كتابتها على النحو التالي [61]:

$$E_1 = K E_0 \quad (26)$$

K : عامل الحركة للارتداد.

E_0 : الطاقة الابتدائية للجسيم الوارد.

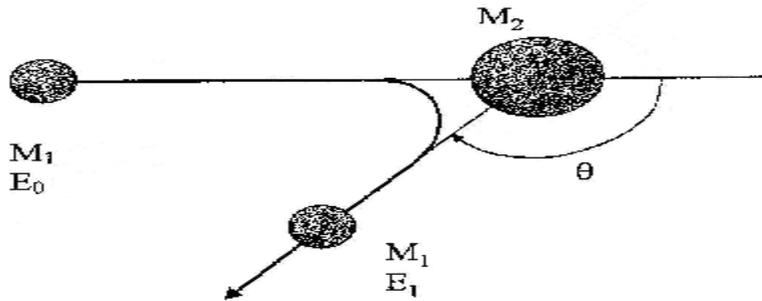
و منه يتم التعبير عن عامل الحركة K بواسطة العبارة التالية :

$$K = \left[\frac{\left(M_2^2 - M_1^2 \sin^2(q) \right)^{\frac{1}{2}} + M_1 \cos(q)}{M_1 + M_2} \right]^2 \quad (27)$$

M_1 و M_2 : كتلة الأيون الوارد و الذرة الهدف على التوالي.

θ : زاوية الارتداد.

من أجل زاوية كشف معطاة، قياس E_1 يسمح بالتعرف على النواة الناشئة و ذلك عن طريق تحديد الكتلة M_2 .



الشكل (15): الانتشار المرن لأيون ذو كتلة M_1 على ذرة الهدف ذات الكتلة M_2 .

لقد تبين تجريبياً بأنه كلما كانت زاوية الانتشار كبيرة كلما كانت الطاقة المحولة للنواة أكبر [64].

كذلك تكون الطاقة المحولة أعظمية من أجل تصادم أمامي يوافق انتشار بزاوية 180° .

2-5 المقطع الفعال للانتشار :

يعرف المقطع الفعال للانتشار المرن $d\sigma/d\Omega$ (بحيث $d\Omega$ الزاوية الصلبة للكشف (الشكل (16))) على

أنه احتمال لحدوث تصادم خاص. فمن خلال العبارة (26) فإن المقطع التفاضلي الفعال للانتشار يتعلق

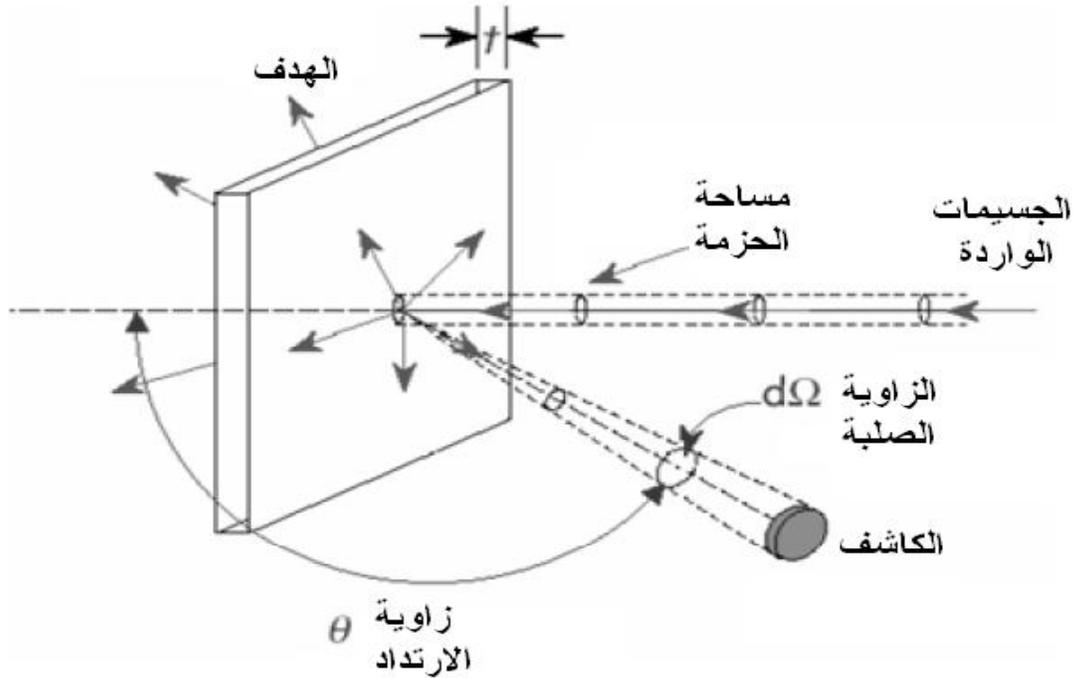
بطبيعة ذرة الهدف، الجسم الوارد، طاقته و كذلك زاوية الكشف θ [62].

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E} \right)^2 \frac{4}{\sin^4(q)} \frac{\left\{ \left[1 - \left(\frac{M_1}{M_2} \sin(q) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \cos(q) \right\}^2}{\left[1 - \left(\frac{M_1}{M_2} \sin(q) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (28)$$

E : طاقة الجسم (القذيفة) قبل الارتداد.

Z_1, Z_2 : الرقم الذري للذيفة و للذرة الهدف على التوالي.

M_1, M_2 : الكتلة الذرية للذيفة و للذرة الهدف على التوالي.



الشكل (16): ارتداد الجسيمات الواردة بواسطة الهدف من أجل زاوية انتشار θ و زاوية صلبة للكشف

$$d\Omega [62].$$

3-5 فقدان الطاقة :

إذا اخترق جسيم المادة بطاقة ابتدائية E_0 ، فإن طاقته الحركية تنقص بالكمية dE عندما يكون قد قطع

مسافة dX و تسمى العبارة dE/dX بفقدان الطاقة. و منه يمكننا التعبير عن طاقة الأيون الوارد في

العمق X بالصيغة التالية :

$$E(X) = E_0 - \int_0^X \frac{dE}{dX} dX \quad (29)$$

في تقنية RBS، نستعمل المقطع الفعال للتوقف الذي يعبر عنه بالعلاقة التالية:

$$e = \frac{1}{N} \frac{dE}{dX} \quad (30)$$

N : الكثافة الذرية للهدف.

باستعمال نظرية التقريب السطحي يتم تمثيل فقدان الطاقة بالمعامل $[\varepsilon_0]$ الذي يتم التعبير عنه على

النحو التالي [62]:

$$[e_0] = \left[\frac{K}{\cos(q_1)} e(E_0) + \frac{1}{\cos(q_2)} e(KE_0) \right] \quad (31)$$

θ_1 : الزاوية بين الحزمة الواردة والناظم على سطح العينة (الشكل (17)).

θ_2 : زاوية الحزمة المرتدة بالنسبة للناظم على سطح العينة (الشكل (17)).

$\varepsilon(E_0)$ و $\varepsilon(KE_0)$: هما قدرة التوقف للمادة عند الطاقة E_0 و KE_0 على التوالي.

إذا كان الهدف يتكون من عنصرين هما A و B فإن المقطع الفعال للتوقف للعنصر A في المادة AB

و العنصر B في AB يتم تمثيله بـ $[e_0]_A^{AB}$ و $[e_0]_B^{AB}$ على التوالي.

يتم التعبير عن الكميتين بواسطة العلاقات (22) و (23):

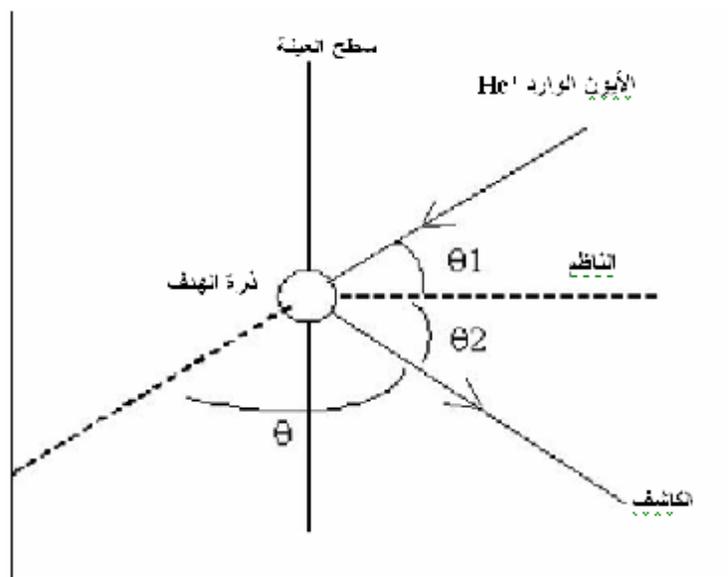
$$[e_0]_A^{AB} = \left[\frac{K_A}{\cos(q_1)} e^{AB}(E_0) + \frac{1}{\cos(q_2)} e^{AB}(K_A E_0) \right] \quad (32)$$

$$[e_0]_B^{AB} = \left[\frac{K_B}{\cos(q_1)} e^{AB}(E_0) + \frac{1}{\cos(q_2)} e^{AB}(K_B E_0) \right] \quad (33)$$

الكميات $\epsilon^{AB}(E_0)$ و $\epsilon^{AB}(K_A E_0)$ أو $\epsilon^{AB}(K_B E_0)$ ، نستطيع تقدير قيمها عن طريق علاقة كثير الحدود التالية :

$$e^{AB}(E_0) = A_0 + A_1(E_0) + A_2(E_0)^2 + A_3(E_0)^3 + A_4(E_0)^4 + A_5(E_0)^5 \quad (34)$$

$$e^{AB}(K_A E_0) = A_0 + A_1(K_A E_0) + A_2(K_A E_0)^2 + A_3(K_A E_0)^3 + A_4(K_A E_0)^4 + A_5(K_A E_0)^5 \quad (35)$$



الشكل (17): الزوايا المستعملة في حساب معاملات فقدان الطاقة.

بحيث المعاملات A_0-A_5 هي ثوابت مجدولة من طرف W. K. Chu و J. F. Zeigler [62] من أجل كل العناصر الموجودة في الجدول الدوري.

5-4 تشتت الطاقة:

إن فقدان الطاقة للجسيم الوارد في الهدف يرافقه تنذبات إحصائية. بعبارة أخرى الجسيمات التي تمتلك نفس الطاقة و نفس السرعة الابتدائية سوف يكون لديها طاقات مختلفة بعد عبورها لنفس العمق في المادة. هذه الظاهرة تدعى بالتشتت (Stragglng).

هذا التشتت في الطاقة يمكن حسابه بواسطة عبارة بوهر [65] المعبر عنها بالعلاقة التالية :

$$\Omega_B^2 = 4p Z_1 e^2 N Z_2 t \quad (36)$$

t : سمك العينة التي تم اختراقها.

6- مطيافية الانتشار الارتدادي لرونر فوردي باستعمال هندسة الاستقناء:

لوحظت ظاهرة الاستقناء في المواد المبلورة من طرف Morgan سنة 1973 [68]، Gemmel سنة 1974 [67] و Picraux سنة 1975 [68]. بحيث تكون الذرات في هذه المواد متموضعة بانتظام وفقا لصفوف أو مستويات بلورية. في هذه الحالة، التفاعل الحادث بين الأيون و المادة لا يتعلق إلا بالزاوية المحصورة بين حزمة الأيونات الواردة و المحاور الأساسية للشبكة البلورية. في هذه الشروط، نقول بأن هذه الأيونات مستقناة، أين نلاحظ انخفاض مهم في عدد الجسيمات المرتدة على سطح العينة. و بالتالي فإن تقنية RBS/C هي بديل عن تقنية RBS الكلاسيكية بحيث يسعى المجرّب فيها لأن يطابق اتجاه حزمة الأيونات الواردة مع عائلة من المستويات أو صفوف ذات عوامل منخفضة لهدف أحادي التبلور. وبذلك تضيف هذه التقنية التحليل البنيوي إلى التحليل البسيط لتقنية

RBS.

تقنية الإستقناء تسمح بـ :

- تقدير درجة التبلور للعيينة.
- تحديد مواقع الشوائب أو العيوب الموجودة في الشبكة البلورية.
- تحديد عمق التوزيع للعيوب في العينة.
- تحديد مكونات و عمق الطبقة الغير مبلورة في السطح.

7- المبدأ الفيزيائي لطريقة RBS/C :

في الجسم الصلب الغير مبلور توزيع عوامل التأثير للتصادمات هي مستقلة عن التوجيه المنسوب إلى حزمة جسيمات بالنسبة للجسم الصلب. خلافا لذلك، ففي مسند مبلور، تأثير الاتجاهات المرتبط بدورية الشبكة البلورية يؤثر بقوة على مردود العمليات الفيزيائية. فعندما أيون وارد يتغلغل في جسم مبلور مع توجيهه بالقرب من محور بلوري، سوف يخضع هذا الايون إلى قوى ممرزة بحيث تجعل مساره مستقرا داخل مركز القناة [70،69]. في هذه الحالة، التصادمات النووية تكون اقل أهمية و مسار الايونات المستقناة في الهدف البلوري يكون أكبر منه في حالة وسط غير مبلور و من نفس الطبيعة. هذه الظاهرة لوحظت تجريبيا عندما تكون الزاوية صغيرة بين اتجاه الجسيمات الواردة و الاتجاه البلوري للهدف المتبلور [66].

7-1 أساس نظرية ليندهارد :

النموذج التحليلي الأكثر مناسبة لهذه الظاهرة هو نموذج ليندهارد [72،71]، الذي اقترح فيه بأن ظاهرة الاستقناء تتعلق بعدد كبير من الذرات، بمعنى تفاعلات متعددة و متتالية أيون-ذرة مرتبطة بعضها مع بعض. لذلك قام المؤلف بتعويض التصادمات المتتالية بإدخاله لمفهوم التفاعل جسيمات مع صفوف من الذرات خاضعة لكمون متوسط مستمر. هذا الكمون لا يتعلق إلا بطبيعة الذرات و المسافة التي تفصل بينها.

هذا النموذج اعتمد على أربعة فرضيات أساسية :

- زوايا الانتشار تكون صغيرة.
- تحدث الاصطدامات مع صفوف من الذرات على طول القناة.
- طاقة الأيون الوارد ليست نسبية لذلك يستعمل الميكانيك الكلاسيكي.
- الشبكة و الصفوف البلورية يمكن اعتبارها مثالية، كتقريب أولي نستطيع إهمال الاهتزازات الحرارية، خصوصا لأن تأثيرها يكون منخفضا جزئيا بواسطة التأثير المتوسط على العدد الكبير للذرات في الصف.
- ليندهارد اعتبر الكمون المتوسط الخاص بطوماس-فيرمي الذي يرتبط بمجموعة صف ذري و يعطى الكمون المتوسط على مسافة r من الصف بالعلاقة التالية :

$$U(r) = \frac{1}{d} \int_{-\infty}^{+\infty} V(\sqrt{Z^2 + r^2}) dz \quad (37)$$

حيث : d : المسافة بين الذرات.

$V(r)$: كمون التفاعل أيون-ذرة.

يكتب $V(r)$ ذو النوع طوماس-فيرمي على الشكل التالي :

$$V(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \Phi(r) \quad (38)$$

حيث $\Phi(r)$: دالة الحجب ذو النوع طوماس-فيرمي .

أعطى ليندهارد تقريب لهذه الدالة و هي كالتالي :

$$\Phi(r) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{C a}{r}\right)^2}} \quad (39)$$

حيث : $C^2=3$

a : نصف قطر الحجب لطومس-فيرمي و يعطى بالعلاقة التالية:

$$a = 0,9 a_0 \left[Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3} \right]^{-1/2} \quad (40)$$

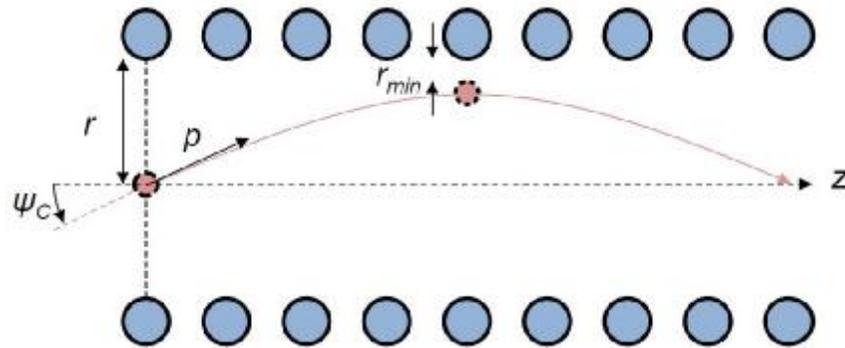
a_0 : نصف قطر بوهر و يساوي $0,53\text{\AA}$.

و منه الكمون المتحصل عليه يدعى الكمون القياسي، و يمكن التعبير عن الكمون المتوسط كالتالي :

$$U(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{d} \ln \left[1 + \left(\frac{C a}{2} \right)^2 \right] \quad (41)$$

7-2 الزاوية الحرجة للاستقناء :

من أجل الوصول إلى استقناء الأيونات في البلورة، يجب أن تصل الحزمة موازية لمحور بلوري ذو مؤشر منخفض، أو بالأحرى لا تتجاوز ميل معين بالنسبة لمحور الاستقناء. ويسمى هذا النطاق الزاوي بالزاوية الحرجة للاستقناء ψ_c (الشكل (18))، بحيث يمكن حسابها نظريا عبر نمذجة الأعمدة الذرية كتوزيع مستمر من الشحنات الكهربائية. في هذه الحالة القذيفة تهتز "بالارتداد" من عمود ذري لآخر مع طول موجة من رتبة عشرة نانومتر. من أجل استقناء وفق المحور Z ، القذيفة سوف تكون تحت تأثير كمون محوري $U(r)$.

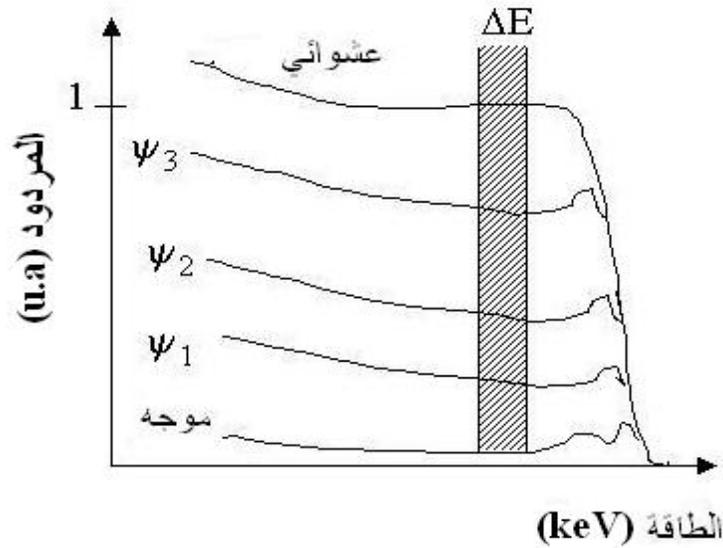


الشكل (18): توضيح مبدأ الاستقناء لأيون داخل بين صفين ذريين.

بسبب التأثير المتمركز للصفوف الذرية، فإن الأيونات المستقناة توجه بقوة نحو مركز القناة، مما يؤدي إلى زيادة حادة في التدفق بهذا الموقع. إذا أردنا حساب مسار الأيونات المستقناة، وبالتالي توزيعها الفضائي، سوف نسلم عموماً أن المركبة العرضية لطاقة الأيون E_{\perp} تكون محفوظة، وهذا يوصلنا إلى إهمال فقدان الطاقة. وسيتم وصف مسار أيون ذو الطاقة E من خلال التغير عن الطاقة العرضية:

$$E_{\perp} = E \Psi^2 + U(r) \quad (42)$$

هذه المعادلة تدل على أن الطاقة العرضية للأيونات الواردة تتعلق بزواوية ورود هذه الأيونات في القناة. وبالتالي شرط الاستقناء يقتضي أن تكون الطاقة العرضية للأيون أصغر من كمون التنافر $U(r)$. ويبين الشكل (19) أثر تغير زاوية الورد (بنفس الطاقة العرضية) على الطيف الموجه، بحيث المردود يتناسب طردياً مع زاوية الورد التي تشكلها حزمة الأيونات الواردة مع البلورة.



الشكل (19): أثر تغير زاوية الورود على الطيف الموجه باستعمال تقنية RBS [62].

من أجل تقدير الزاوية الحرجة ψ_C ، باستعمال مبدأ انحفاظ الطاقة الكلية العرضية E_{\perp} ، نحصل على:

- في مدخل القناة لدينا : $U(r)=0$ و $E_{\perp}=E \psi^2$.

- و على مسافة قريبة r_{\min} لدينا : $\psi=0$ و $E_{\perp}=U(r_{\min})$. ومنه :

$$\psi_C = \left(\frac{U(r_{\min})}{E} \right)^{1/2} = \frac{\psi_1}{\sqrt{2}} \left[1 + \ln \left(\frac{C a}{r_{\min}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (43)$$

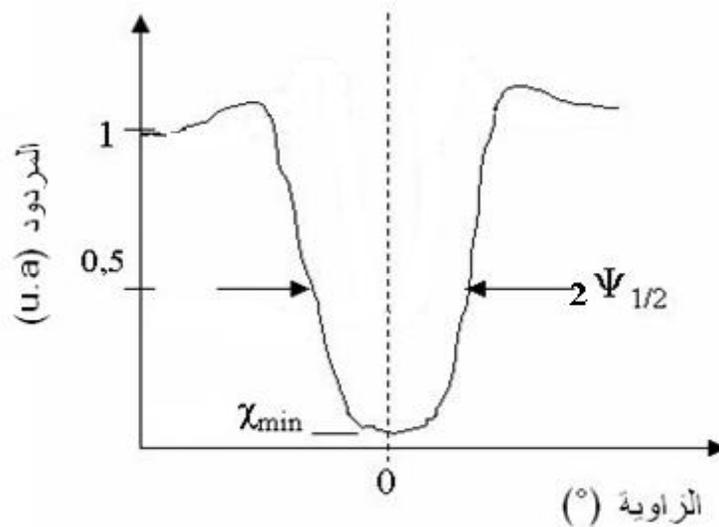
$$\psi_1 = \left[\frac{2 Z_1 Z_2 e^2}{E d} \right]^{1/2} \quad (44)$$

ψ_1 : الزاوية الحرجة باستعمال كيون طومس-فيرمي.

E : طاقة الورود.

d : المسافة الذرية على طول المحور المعتبر.

الزاوية الحرجة ψ_C هي معامل نظري لا يمكن الوصول إليها مباشرة أثناء التجربة. أما تطبيقياً، فإننا نستطيع الوصول إلى $\psi_{1/2}$ (الشكل (20)) وهي عرض منتصف الارتفاع لمنحنى المسح الزاوي.



الشكل (20): منحنى المسح الزاوي المسجل وفقاً لمحور بلوري وعلى طول المستوي [62].

3-7 مردود الاستثناء :

إن المقارنة بين الأطياف المكتسبة في الهندسة الكلاسيكية (العشوائية) وهندسة الاستثناء، تتيح لنا قدراً كافياً من المعلومات. فمن أجل تحديد كمية تأثير الاستثناء نعرف مردود الاستثناء χ_{min} بالنسبة لشدة الطيف في هندسة الاستثناء Y_C و شدة الطيف في الهندسة العشوائية Y_A .

$$c_{min} = \frac{Y_C}{Y_A} \quad (45)$$

تتعلق قيمة χ بالزاوية ψ بين الشعاع الوارد ومحور البلورة. فعندما تكون ψ تساوي الصفر، يكون المجال الطاقى خلف ذروة السطح تماماً، و بذلك نحصل على مردود الاستثناء الأدنى χ_{min} . قيمة

χ_{\min} هي مقياس لجودة أحادي البلورة. من أجل بلورة مثالية، نسبة الاستثناء الأدنى يمكن تقديرها نظريا من خلال العبارة التالية:

$$c_{\min} = N d p r_{\min}^2 \quad (46)$$

4-7 عدم الاستثناء والعيوب الموجودة في البلورة :

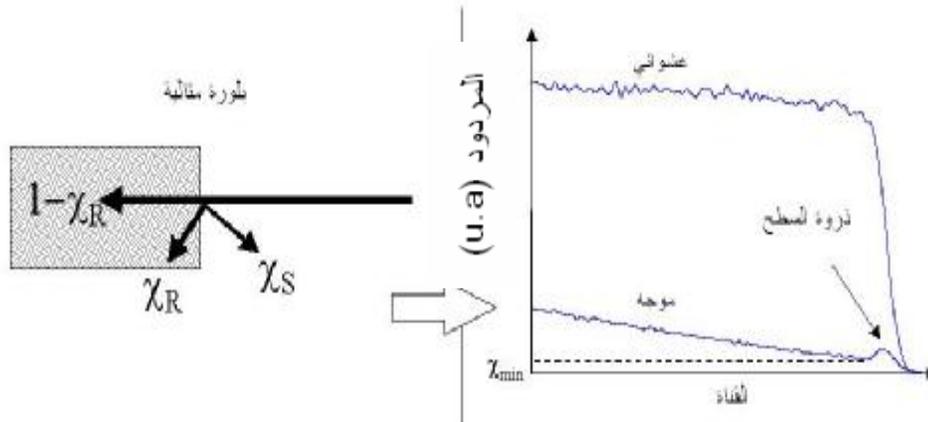
تكون مقارنة انحفاظ الطاقة العرضية للأيونات المستقناة صالحة من أجل أعماق منخفضة تم تحليلها، ولكن يجب إهمالها عندما يكون اختراق الأيونات أعمق في البلورة. في هذه الحالة، يتزايد متوسط الطاقة العرضية مع العمق بسبب الانتشار المتعدد للأيونات بواسطة أنوية والكترونات الهدف. يمكن لبعض الأيونات أيضا امتلاك ما يكفي من الطاقة للتغلب على الحاجز الكموني للقناة وتكون بالتالي غير مستقناة. تأخذ هذه الأيونات في الحسبان في العنصر العشوائي للحزمة.

التغير في الطاقة العرضية E_T بدلالة العمق يمكن كتابته على النحو التالي :

$$\frac{dE_T}{dX} = E \frac{d\Psi^2}{dX} + \Psi^2 \frac{dE}{dX} \quad (47)$$

يمثل الطرف الأول في هذه العبارة تزايد الطاقة العرضية نتيجة للانتشار المتعدد. أما الطرف الثاني فيعبر عن تناقص الطاقة العرضية نتيجة لتباطؤ الأيونات. يتم إهمال هذا العنصر في كثير من الأحيان. إذا تعاملنا مع بلورة مثالية، الزيادة في الطاقة العرضية ترجع أساسا إلى الانتشار عبر الالكترونات: بحيث تبقى نسبة الأيونات المستقناة $(1-\chi_R)$ (هذه المركبة تكون موجهة على طول الاتجاه البلوري بواسطة تصادمات مترابطة مع الصفوف الذرية) متمركزة داخل القناة ولا تقترب من الذرات المجاورة. فعندما يتزايد متوسط الطاقة العرضية، تقترب الأيونات المستقناة من الانوية الذرية [74،73].

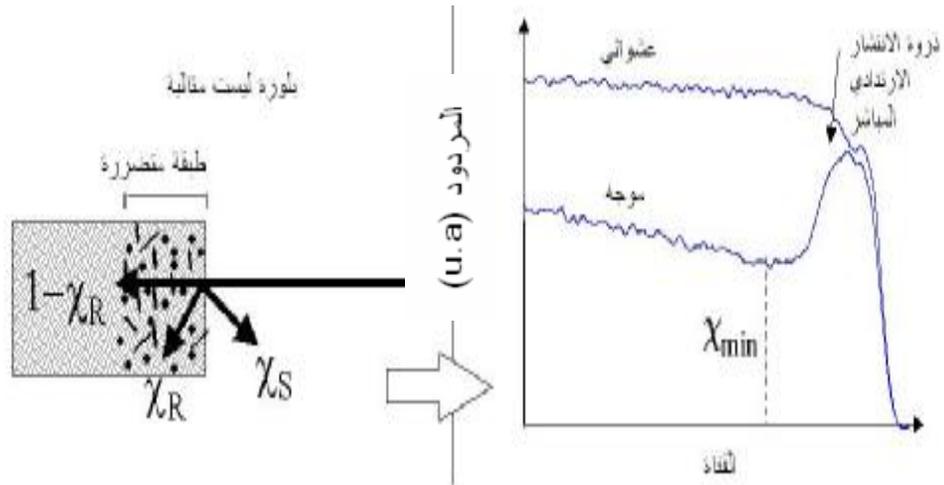
عملياً، إذا كانت البلورة التي تم تحليلها مثالية (الشكل (21))، فإن الطيف المسجل بالنسبة للاتجاه الخاص بالاستقناء يبين انخفاض حاد جداً في مردود الانتشار الارتدادي المباشر χ_S (مركبة منخفضة نسبياً تمثل الجسيمات المرتدة) بالنسبة إلى الطيف المسجل في اتجاه عشوائي [26].



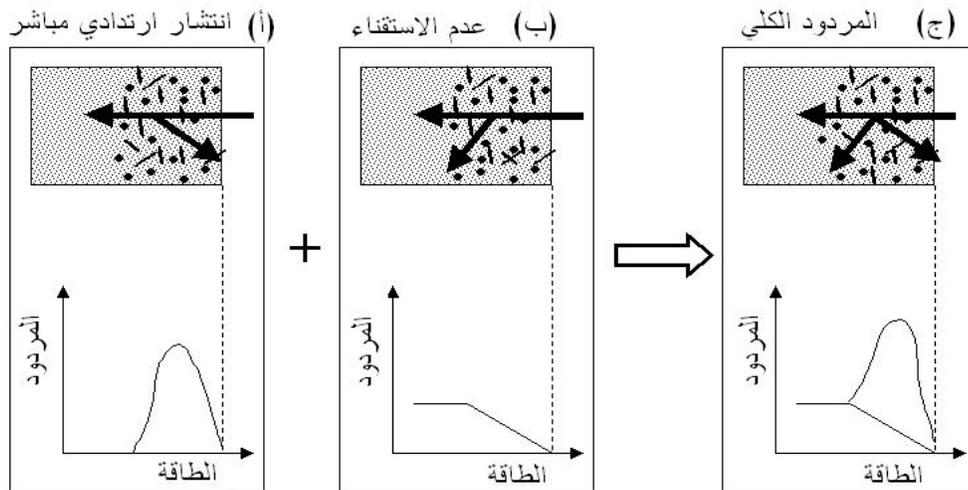
الشكل (21): رسم بياني يبين الطيف الموجه مع الطيف العشوائي في حالة بلورة مثالية [75].

وبالتالي زيادة نسبة الأيونات غير المستقناة χ_R (هذه المركبة لا تتأثر بالترتيب الدوري لذرات البلورة) بدلالة العمق تكون منخفضة [74،73]. خلافاً لذلك، فإن نسبة الأيونات غير المستقناة يتزايد بشكل كبير في بلورة تحتوي على عيوب [76،26] (الشكل (22)). لذلك فإن مردود الانتشار الارتدادي يكون ناتجاً عن عنصرين (الشكل (23)): يتشكل العنصر الأول من الجسيمات التي تدخل في تصادمات مع الطبقات الذرية الأولى ويؤدي إلى ظهور منطقة في الطيف تدعى بذروة السطح. أما العنصر الثاني فهو نسبة الأيونات الغير مستقناة على أي ذرة من الهدف. و مردوها إلى الاهتزازات الحرارية لذرات الهدف وهي تتزايد بشكل مستمر مع العمق. فعندما يتم تحليل بلورة تحتوي على عيوب، نقول بأن هناك عنصر ثالث يدعى بالانتشار الارتدادي الحادث مباشرة. وهو ناتج عن الانتشار الارتدادي لأيونات حزمة التحليل على ذرات البلورة التي غيرت موقعها الخاص بها في البلورة.

هذا يترجم على الطيف المسجل الخاص بالاستقناء و ذلك بظهور ذروة للانتشار الارتدادي ذات ارتفاع موافق لعمق معطى و هو متناسب طردا مع كمية العيوب الموجودة [26].



الشكل (22): رسم بياني يبين الطيف الموجه مع الطيف العشوائي في حالة بلورة غير مثالية [75].



الشكل (23): رسم بياني يبين التزاوج بين الانتشار الارتدادي المباشر و عدم الاستقناء [75].

وبالإضافة إلى ذلك، فإن طبيعة وتركيز هذه العيوب لها تأثير على أهمية نسبة الأيونات غير المستقناة. على سبيل المثال، فالعيوب الموسعة مثل الانخلاعات، تسبب زيادة في الطاقة العرضية للأيونات غير المستقناة، وبالتالي زيادة في نسبة عدم الاستقناء [76]. بحيث نسبة الأيونات غير المستقناة تتزايد بطريقة مستمرة بدلالة التغلغل في المادة. لذلك فإن أهمية عملية عدم الاستقناء تتعلق بطبيعة العيوب (عيوب نقطية، انخلاعات حلقيّة، المناطق غير المبلورة...) و تركيزها في المادة. فالعيوب النقطية (الفجوات، الانغراسية أو ذرات أجنبية، تتواجد في مواضع انغراسية في الشبكة البلورية) تنتج انتشارا ارتداديا مباشرا لحزمة الأيونات الواردة. ففي هذه الحالة، تكون نسبة الانتشار الارتدادي متناسبة طرديا مع تركيز العيوب على عمق معين.

5-7 تحديد سمك الطبقة غير المبلورة :

من خلال طيف RBS في الهندسة الموجهة، نستطيع تحديد سمك الطبقة المتضررة بسبب عملية الزرع الأيوني (و التي تكون في حالة غير مبلورة). لذلك استغللنا لهذا الطيف (الإشارة الخاصة بذرات المصفوفة، في حالتنا السليكون) في حساب العرض الكلي لنصف الارتفاع الخاص بطاقة الارتداد ΔE في السطح سوف يسمح لنا بتقدير السمك ΔX لهذه الطبقة و ذلك من خلال المعادلة التالية [52]:

$$\Delta X = \frac{\Delta E}{N_{Si} [e_0]_{Si}^{Si}} \quad (48)$$

6-7 تحديد موقع الذرات في البلورة :

تحديد موقع الذرات هي واحدة من أهم التطبيقات الأكثر استعمالا في هندسة الاستقناء، فعندما نستعمل حزمة من الجسيمات موازية لمحور بلوري ثم نقوم بإجراء مسح زاوي حول المحور المعتبر سوف

نجد بأن مردود الانتشار الارتدادي يمر بقيمة أدنى. ثم بعد ذلك يتزايد حتى يصل إلى قيمة عظمى توافق الحالة العشوائية. ثم يتناقص مشكلا بذلك بئرا يدعى ببئر الاستثناء الذي يلعب دورا مهما في تحديد مواضع الشوائب في البلورة و التي يمكن أن تتواجد في أحد المواضع (الشكل(24)):

- موقع احلالي (الشكل(24-أ)).

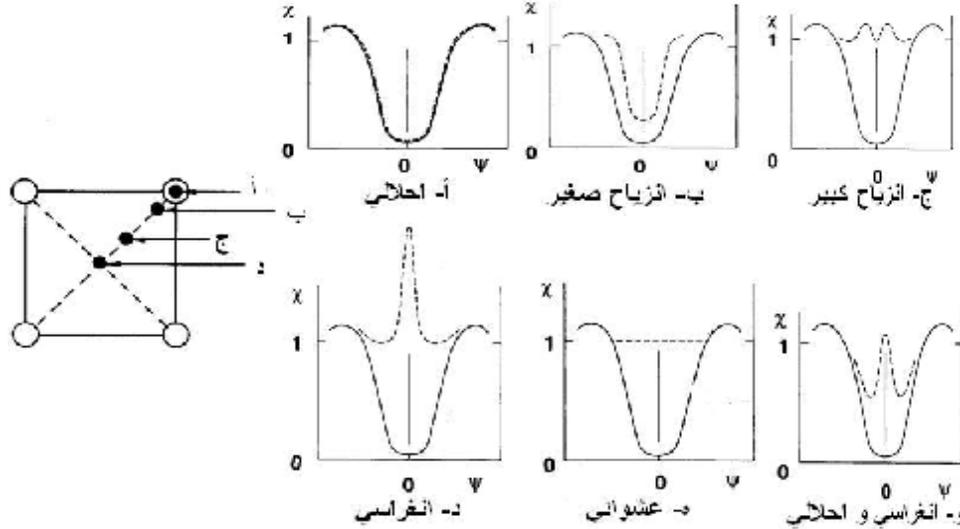
- الانزياح الصغير (الشكل(24-ب)).

- الانزياح الكبير (الشكل(24-ج)).

- موقع انغراسي (في مركز القناة) (الشكل(24-د)).

- موقع عشوائي (الشكل(24-ه)).

- موقع انغراسي و احلالي (الشكل(24-و)).



الشكل (24): مواضع الشوائب داخل البلورة باستعمال المسح الزاوي وفقا لمحور بلوري [77].

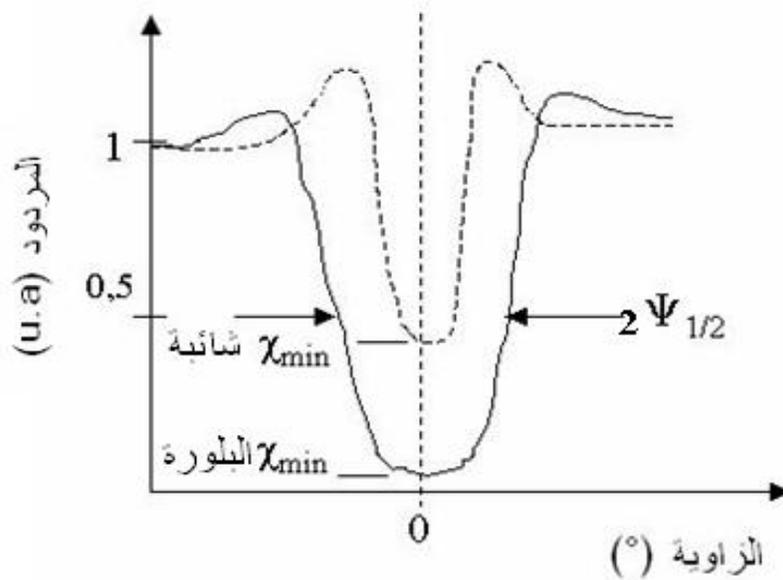
إذا أردنا مثلا تحديد نسبة الشوائب المتواجدة في المواقع الاحلالية لبلورة ما، نستعمل مقدار يدعى

بنسبة الذرات المتموضعة احلاليا F_S و يعطى بالعلاقة التالية [62،78]:

$$F_s = \frac{1 - c_{\min}^{\text{impurete}}}{1 - c_{\min}^{\text{cristal}}} \quad (49)$$

$c_{\min}^{\text{impurete}}$: المرود الأدنى لبئر الاستقناء من اجل الشوائب (الشكل (25)).

$c_{\min}^{\text{cristal}}$: المرود الأدنى لبئر الاستقناء من اجل البلورة (الشكل (25)).



الشكل (25): بئر الاستقناء الخاص بالشائبة و البلورة [62].

8- البرامج المستعملة لمحاكاة أطياف RBS التجريبية:

إن الحصول على نتائج تجريبية معينة و بتقنية ما لا يكفي لاستغلالها، بل يتحتم علينا تحليلها و استخراج كل المعلومات التي تحتويها. هذا التحليل يتم بواسطة برامج مهياة بنماذج و نظريات نستطيع من خلالها استخراج مجموعة المعلومات المتضمنة في النتائج. ففي حالة الأطياف التجريبية المتحصل عليها بتقنية الارتداد لروذرفورد، يستعمل عادة مجموعة برامج تحليل الحزمة الأيونية (IBA) مثل

برنامج RUMP و SIMNRA في الهندسة العشوائية و هناك برنامج آخر يدعى RBX يستعمل في الهندسة العشوائية و الاستقناء معا.

8-1 برنامج RUMP(Rutherford Universal Manipulation Program) :

أنشأ هذا البرنامج من قبل طومسون (M.O.Thompson) و دوليتل (L.R.Doolittle) سنة 1985 و هما المبتكران الأساسيان للخوارزميات الحاسوبية المتضمنة في البرنامج [79،80]. حيث تم تطويره في البداية في جامعة كورنيل في مجموعة الأستاذ ماير (J.W.Mayer) ، المؤلف المشارك للمراجع الأساسية الخاصة بتقنية الارتداد لروذر فوردر RBS [62،81]. الغرض من استعمال هذا البرنامج الذي هو عبارة عن سلسلة من الإجراءات بلغة فورترن، هو محاكاة و تحليل الأطياف التجريبية المتحصل عليها بواسطة تقنية RBS و ذلك في الهندسة العشوائية.

يستخدم RUMP جداول قدرة التوقف dE/dx الخاص ببرنامج TRIM، بالإضافة إلى ذلك يحتوي على برنامجين جزئيين هما SIM و PERT [81]. الواجهة الأساسية للبرنامج موضحة في الشكل(26).

البرنامج الأول يسمح بتحديد تركيب الهدف سواء كان بسيطاً (طبقة فوق مسند) أو معقداً (متعدد الطبقات، كل أنواع مظاهر الانتشار). أما الثاني فالهدف منه هو تحليل المعطيات عن طريق التطابق المتعاقب. هذا البرنامج يأخذ في الحسبان مجموعة المعطيات التجريبية الموفرة من قبل المستعمل لكي يعيد إنشاء أطياف تجريبية أفضل و ذلك بمعرفة هندسة التركيب، نوع و طاقة الأيونات الواردة، و كذلك تيار الحزمة الواردة، الشحنة الكلية المودعة في الهدف و خصائص الكاشف.

عدة عوامل خاصة بالعتاد التجريبي يجب أن تأخذ في الحسبان من أجل حساب سمك طبقات الهدف و التراكيز العنصرية للعناصر الكيميائية المكونة للهدف من بينها(الشكل(27)) : نوع الجسيمات الواردة

و طاقتها، الزاوية الصلبة للكشف، الهندسة الخاصة بالنظام (زاوية الحزمة الواردة مع الهدف و الكاشف) و مميزات الكاشف. وعلى الرغم من ذلك، فإن برنامج RUMP يحاكي أطيف RBS المتحصل عليها بواسطة الهندسة العشوائية فقط و هو غير قادر على أن يأخذ بعين الاعتبار هندسة التوجيه (الاستقناء).

لقد استعملنا هذا البرنامج من أجل تحديد الشروط الأمثل للقياس ولتحليل الأطيف التي تحصلنا عليها بتقنية RBS و ذلك باستخراج مجموعة المعلومات التي تحتويها.

```

XRump
File/Plot Window Layout Edit Variables Help
RUMP Shell for NT, OS/2 & Posix [Rev. 1.02 12/28/98 (c) CGS]
Executing initialization file: D:\Program Files\cgs\RUMP\NT\rump.ini

/=====\
|          RUMP - RBS Analysis and Simulation Package [v. 4.00(beta)]          |
|          (c) 1988-2002 Michael Thompson, Larry Doolittle                    |
|          (c) 1988-2002 Computer Graphic Service, Ltd. All rights reserved    |
|          Serial Number:                                                       |
|          Revision Level: Version 0.950                                       |
|          Revision Date: Thu Nov 30 14:20:04 2006                             |
|          Compile Date: Nov 30 2006 14:20:04                                 |
\=====/

Loading atomic data: D:\Program Files\cgs\RUMP\Data\atom4.dat
Loading Ziegler data: D:\Program Files\cgs\RUMP\Data\pscoef.dat
Loading Kalbitzer data: 8 dE/dx entries: D:\Program Files\cgs\RUMP\Data\newstop
.kal
Loading atomic density table: D:\Program Files\cgs\RUMP\Data\density.tab

Hey, man, what next? /* Rump initial configuration
Your wish? alias t dev -text
Your wish? alias g dev -graph
Your wish?
Igen, uram! /* Plotting parameters
Igen, uram! SYMBOLMAP 1 FilledTriangle 1.25 2 FilledSquare 1.25 3 FilledStar 1
.25
Symbol # to set (quit): 4 FilledCircle 1.25 5 OpenTriangle 1 6 OpenSqua
re 1
Symbol # to set (quit): 7 OpenDiamond 1 8 OpenStar 1 9 OpenCirc
le 1
Symbol # to set (quit): 10 Asterisk 1 11 Cross 1 12 X
1
Symbol # to set (quit): 13 FilledLeftTria 1 14 FilledRightT 1 /
Whoopee! hcopy on
Hey, man, what next? ltype 1 pen -1
INFO: Macro completed normally
You called? |
    
```

الشكل (26): واجهة برنامج RUMP الخاصة بمحاكاة النتائج المحصل عليها بتقنية RBS .

```

I want a cookie!! act
RBS File: dummy.rbs
Identifier: Initialized buffer
LTCT Text:
Date:
Beam: 3.000 MeV 4He++ 10.00 uCoul @ 0.00 nA
Geometry: Cornell Theta: 7.00 Phi: 9.00 Psi: 0.00
MCA: Econv: 4.000 0.000 First chan: 0.0 NPT: 0
Detector: FWHM: 20.0 keV Tau: 5.0 Omega: 4.000
Correction: 1.0000
Next?

```

الشكل (27): واجهة برنامج RUMP توضح أهم العوامل الخاصة بالتجهيز التجريبي المستعملة في

محاكاة أطياف RBS التجريبية.

8-2 برنامج SIMNRA :

برنامج SIMNRA [83] ينتمي إلى مجموعة برامج تحليل الحزمة الأيونية (IBA)، و هو مخصص لتحليل الأطياف المتحصل عليها بواسطة تقنية RBS. بدأ تطوير هذا البرنامج من قبل Matej Mayer منذ 1996 و هو برنامج وندوز ذو واجهة مستخدم رسومية بشكل قوائم و نوافذ (الشكل (28)) [66]. هذا البرنامج يسمح بنمذجة طيف نظري RBS و بتكليفه مع الطيف التجريبي و ذلك عن طريق تغيير تركيبة وكثافة العينة حتى الحصول على قيم مقبولة.

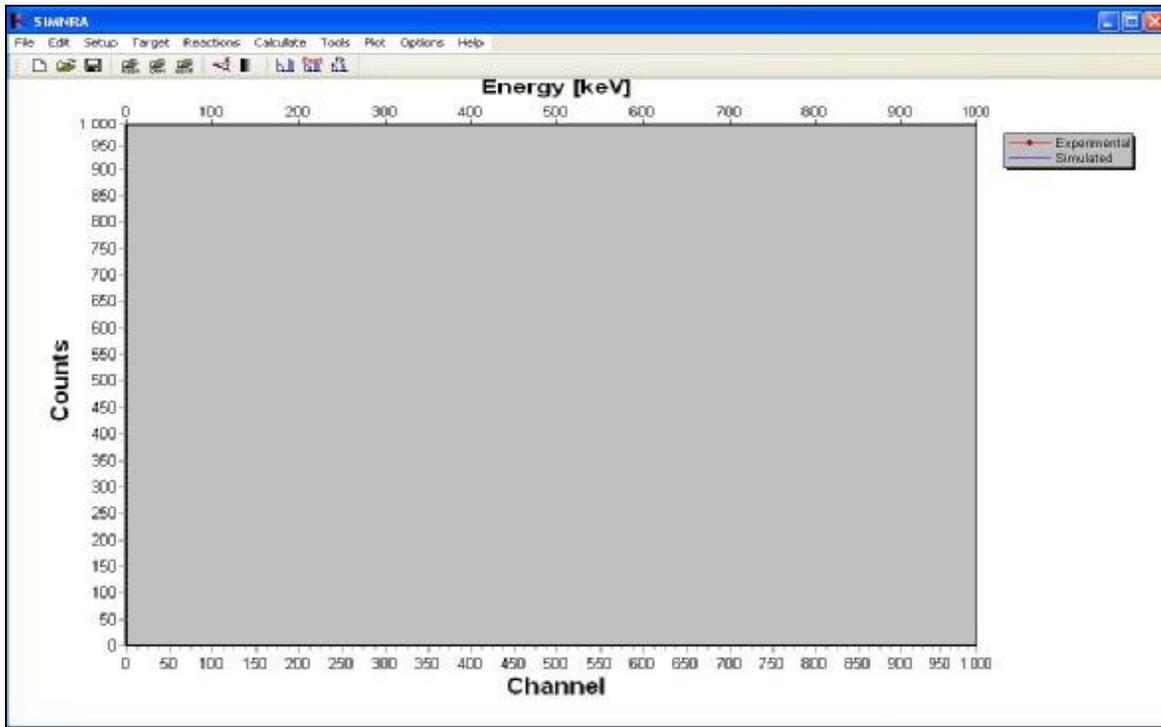
عمليا كل البرامج IBA مزودة بنموذج بور [84]، مع (أو بدون) تصحيح تشو [85] و يانغ [86]. إضافة إلى ذلك، يستخدم هذا البرنامج قيم زيقلار و بيرسك من أجل حساب قدرة التوقف الالكتروني للأيونات السريعة و الثقيلة. كما يستعمل أيضا الكمون القياسي لـ ZBL من أجل حساب قدرة التوقف النووي [87،52].

هذا البرنامج، يعمل بشكل تكراري و في نمط تحادثي، بحيث يضبط الطيف التجريبي مع طيف المحاكاة بطاقة الجزيئات المنتشرة في العينة. لذلك فإن العينة التي نقوم بتحليلها تتمذج في معظم البرامج و خاصة في برنامج SIMNRA بواسطة مادة متعددة الطبقات و متجانسة في تركيبها و

سمكها [89،88]. تسمح هذه الطبقات المتتالية (للمادة ذات التركيب المختلف) بمحاكاة تدرج التراكيز للعنصر المكتشف داخل العينة التي نقوم بتحليلها. عادة، يتم ضبط تركيب الطبقات تدريجياً حتى تتطابق الأطياف التجريبية مع المحاكاة.

وعلى النقيض من البرامج الأخرى التي تحاكي أطياف RBS فإن SIMNRA سهل الاستخدام وذلك بفضل واجهة المستخدم في مايكروسوفت ويندوز. وعلى الرغم من ذلك، فإن برنامج SIMNRA يحاكي أطياف RBS المتحصل عليها بواسطة الهندسة العشوائية فقط و هو غير قادر على أن يأخذ بعين الاعتبار هندسة التوجيه (الاستثناء).

من جهة أخرى عدة عوامل خاصة بالعتاد التجريبي (الشكل (29)) يجب أن تأخذ في الحسبان من أجل حساب سمك طبقات الهدف و التراكيز للعناصر الكيميائية المكونة للهدف من بينها : نوع الجسيمات الواردة و طاقتها، الزاوية الصلبة للكشف، الهندسة الخاصة بالنظام (زاوية الحزمة الواردة مع الهدف و الكاشف) و مميزات الكاشف.



الشكل(28): واجهة برنامج SIMNRA الخاصة بمحاكاة النتائج المحصل عليها بتقنية RBS .

File	
Incident ion	
<input type="radio"/> H	<input type="radio"/> 3He
<input type="radio"/> D	<input checked="" type="radio"/> 4He
<input type="radio"/> T	<input type="radio"/> Other
Other ion	
Element	He
Mass	4
Energy (keV) 2000.00	
Geometry	
α Incident Angle (Deg)	0.00
β Exit Angle (Deg)	15.00
θ Scattering Angle (Deg)	165.00
Calibration	
Calibration Offset (keV)	0.000
Energy per Channel (keV/ch)	1.0000
Quadratic Term (keV/ch**2)	0.000E+0
More energy calibration options	
Particles * sr	1.000E+12
Energy resolution	
Detector Resolution (keV)	15.000
Energy spread of incident beam (keV)	0.000

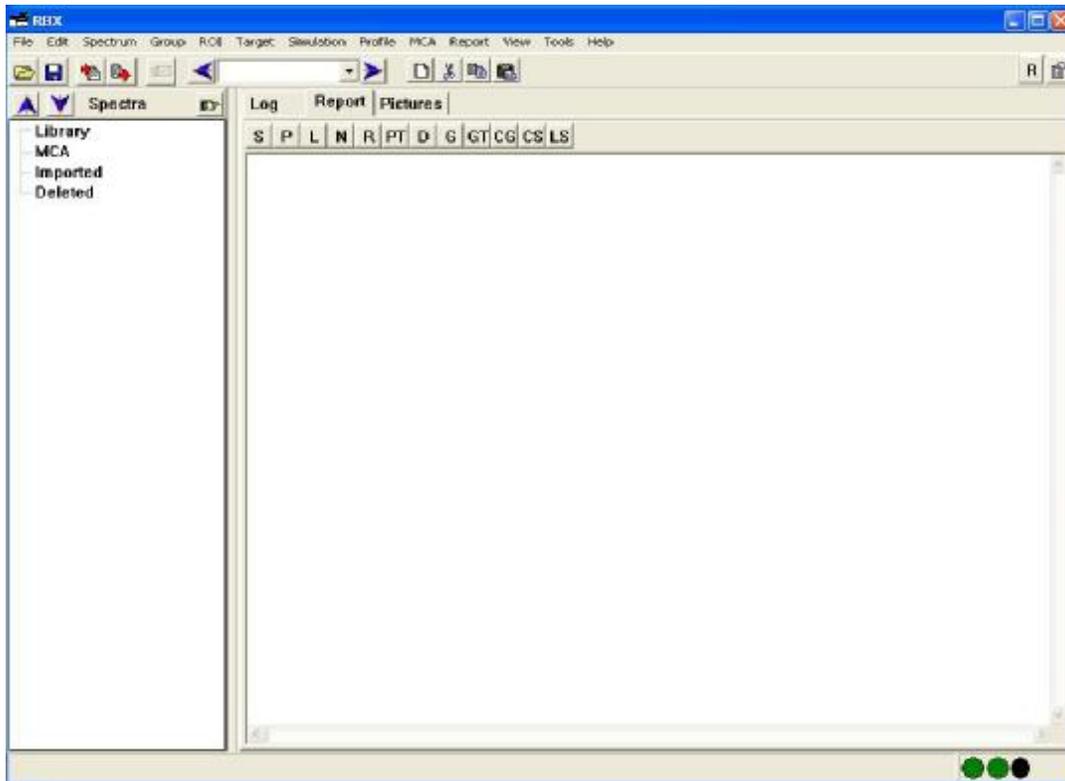
الشكل(29): عتبة حوار في برنامج SIMNRA توضح أهم العوامل الخاصة بالتجهيز التجريبي

المستعملة في محاكاة أطيف RBS .

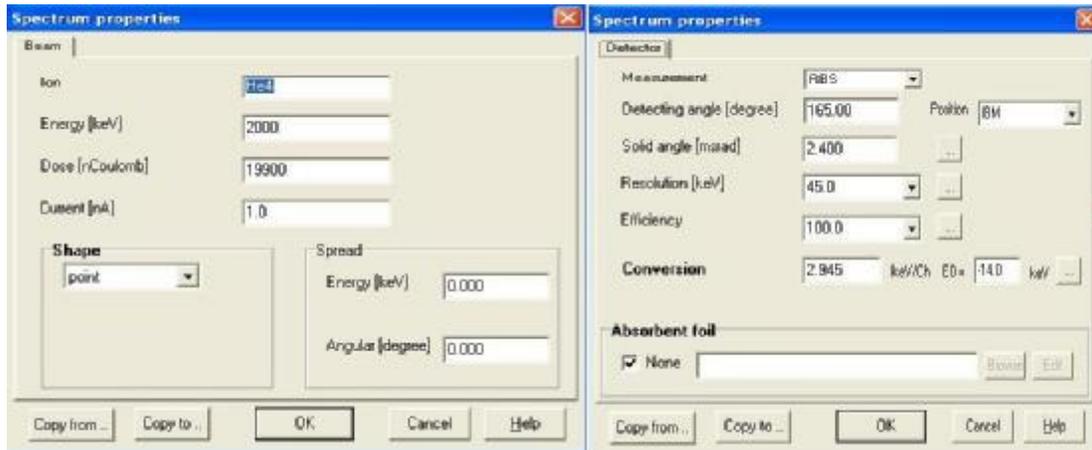
8-3 برنامج RBX :

برنامج RBX مخصص لمحاكاة و تحليل أطياف RBS المتحصل عليها بواسطة الهندسة العشوائية أو التوجيهية (الاستقناء). بدأ تطوير هذا البرنامج من قبل E.Kotai منذ 1984 و هو برنامج ذو واجهة مستخدم رسومية (الشكل(30)) [91،90]. بحيث يستند هذا البرنامج على تجميع الطيف التفاعلي (بمعنى يتم التركيب بواسطة افتراض هيكل طبقات معينة ومقارنة نتائج المحاكاة مع البيانات التجريبية في عملية تكرارية) مع الأخذ بعين الاعتبار، أثناء المحاكاة عامل الحركة، المقطع الفعال للانتشار، التشتت و المقطع العرضي للتوقف من برنامج SRIM. ولكنه يضيف أيضا العديد من التصحيحات النظرية والتجريبية الأخرى [84-86].

يمكن أن يستخدم البرنامج أي تركيبة جسيم-هدف، و طاقة الحزمة بين 100keV و 10MeV. بالإضافة إلى الإعدادات التجريبية (الطاقة، الهندسة، الكاشف....)(الشكل(31))، فإن المدخلات الرئيسية للمحاكاة في RBX هي : سمك الطبقات و العناصر الموجودة في العينة وتركيبها. أما المخرجات فهي طيف المحاكاة ومنحنى العمق. زيادة على ذلك فإنه يسمح لنا بالتركيب التحليلي للأطياف الموجهة بما في ذلك شدة ذروة السطح، الحد الأدنى للمردود و نسبة عدم الاستقناء. و في الأخير نقول بأن هذا البرنامج يتميز على البرامج سابقة الذكر بميزة رئيسية و هي أنه متضمن للمحاكاة التحليلية الخاصة بالتوجيه(الاستقناء)، وهي ظاهرة مهمة جدا للتحليل البنيوي خاصة فيما يخص تقدير العيوب البلورية من طيف الاستقناء .



الشكل (30): واجهة برنامج RBX الخاصة بمحاكاة النتائج المحصل عليها بتقنية RBS .



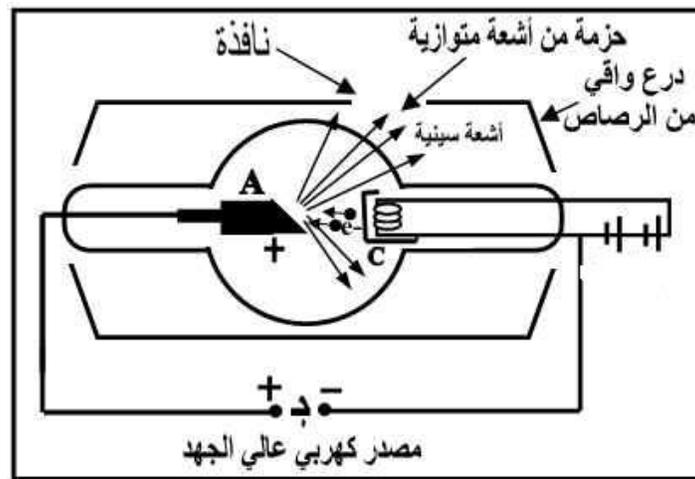
الشكل (31): علبتا حوار في برنامج RBX توضحان أهم العوامل الخاصة بالتجهيز التجريبي المستعملة

في محاكاة أطياف RBS .

9- مطيافية انعراج الأشعة السينية DRX :

حيود الأشعة السينية (Diffraction des Rayons X) هي الطريقة الأكثر استعمالاً من أجل توصيف (تعيين خصائص) بنية المواد. حيث يمكن استخدامها من أجل مختلف أنواع العينات: الصلبة، المساحيق و الشرائح الرقيقة. هذه التقنية تسمح بقياس معاملات الخلية و حجم البلورات الصغيرة و كذلك تحديد بدقة بنية الشرائح. حيث هذا التحليل يمكن أن ينجز على عمق اختراق أكبر من $10\ \mu\text{m}$ و درجة وضوح في العمق ب 200\AA .

يتم إنتاج الأشعة السينية بفضل سلك (الكاتود) و فرق جهد ببضع عشرات من keV (الشكل (32)). من خلال ذلك، سوف تسرع الإلكترونات الناتجة من الكاتود و تتبع نحو القطعة المعدنية (الأنود أو الهدف) التي تولد الأشعة السينية. حيث هذه الأشعة المتولدة تحدث عندما تكون طاقة الإلكترونات كبيرة كفاية من أجل إثارة المستويات الأساسية (K,L,M,...) لذرات الأنود.



الشكل (32): رسم بياني يمثل تركيب أنبوبة الأشعة السينية.

الخطوط المميزة الأكثر شدة تكون خطوط K_{α} من أجل الانتقالات التي تحدث من الطبقات L نحو الطبقات K. في الغالب، يستعمل الأنود من مادة النحاس أو المولبدان، فهي تصدر طاقة تقدر بـ

8.04keV و 17.44keV و التي توافق طول موجة تقدر بـ 1.54Å و بـ 0.71Å على التوالي [92،3]. لتحديد الخط المتوسط K_{α} ، يستعمل جهاز قياس انعراج الأشعة السينية مرشحا أحادي اللون من النيكل. الطريقة الأكثر استعمالا في DRX هي طريقة $2\theta-\theta$ من أجل دوران العينة بزواوية θ و دوران الكاشف بزواوية 2θ [93] (الشكل(33)). بحيث يتم الكشف عن الأشعة المنعرجة من قبل المستويات البلورية (hkl) بزواوية θ فقط و التي تحقق قانون براج الذي يعطى بالعلاقة التالية :

$$2 d_{hkl} \sin(q_{hkl}) = n \lambda \quad (50)$$

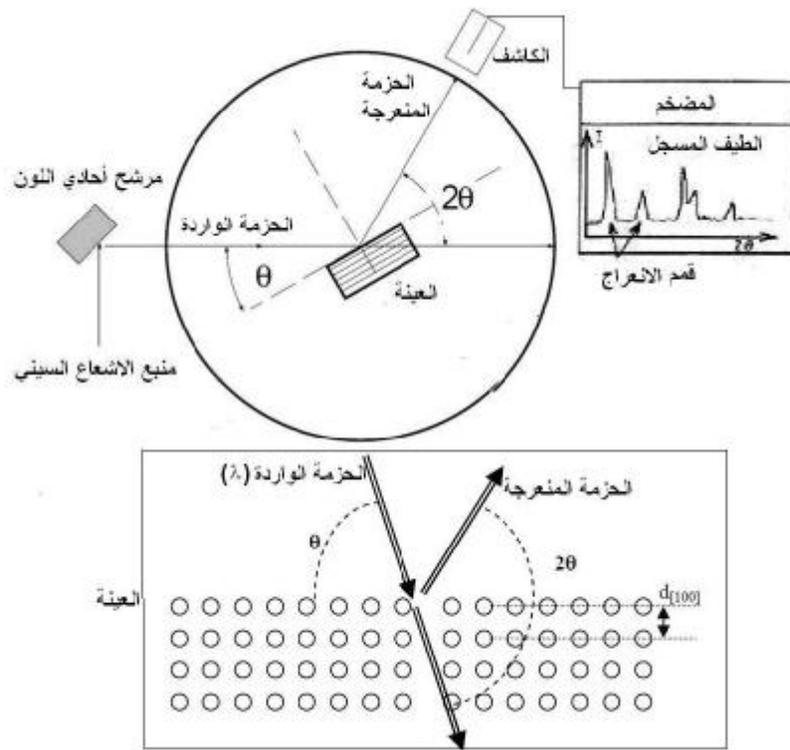
حيث : n : رتبة الانعراج (عدد صحيح)

d_{hkl} : المسافة البينية لمجموعة المستويات (hkl).

θ : زاوية الانعراج.

λ : طول الموجة للإشعاع السيني.

في الأخير يتم تثبيت نظام الكتروني من أجل إعطاء الطيف $I(2\theta)$ الذي نميز من خلاله القمم النسبية للخطوط (hkl). نلاحظ بأن I و 2θ تشير على التوالي إلى شدة و موقع كل خط.



الشكل (33): رسم بياني يمثل مبدأ انعراج الأشعة السينية.

تعتبر مطيافية انعراج الأشعة السينية وسيلة جيدة لتحديد أي تغير في المادة المزروعة و ذلك على مستوى الشبكة البلورية. أحد هذه التغيرات هو معامل الشبكة و الذي يعبر عنه بأنه إجهاد داخلي في الشبكة البلورية للعينة نتيجة عملية الزرع الأيوني [95،94]. هذا التغير في معامل الشبكة يظهر في طيف الأشعة السينية على شكل إزاحة للخط المميز للعينة المزروعة مقارنة بالخط المميز للعينة المرجع.

لتحديد هذا التغير في الشبكة البلورية استعملنا العبارة التالية التي تم استنتاجها من علاقة براغ [94]:

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta a}{a} = ctg(q_B) \Delta q \quad (51)$$

Δd : الفرق بين المسافة البينية لمجموعة المستويات للعينه المزروعة و العينه المرجع.

a : ثابت الشبكة الخاص بالعينه المرجع.

Δa : الفرق بين ثابت الشبكة للعينه المزروعة و العينه المرجع.

θ_B : زاوية الانعراج لبراغ.

$\Delta\theta$: الفرق بين زاوية الخط المميز للعينه المزروعة و العينه المرجع.

و بالتالي يمكن تقدير الإجهاد الداخلي للعينه بالعباره التاليه [96,94]:

$$e = ctg(q_B) \Delta q \quad (52)$$

ε : الإجهاد.

10 - مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه FTIR :

مطيافية امتصاص الأشعة تحت الحمراء (la Spectroscopie InfraRouge à Transformée de Fourier)

هي تقنية توصيف فيزيوكيميائية غير متلفة للعينه [97]. و هي تركز على قياس مدى امتصاص

العينه لهذه الأشعة اعتمادا على الأطوال الموجية. تمتد منطقة الأشعة تحت الحمراء من $0.8\mu m$ إلى

$1000\mu m$ وهي مقسمة إلى 3 مناطق من حيث الترددات (الأعداد الموجية) أو الأطوال الموجية :

- الأشعة تحت الحمراء البعيدة ($\lambda = 1000-25\mu m / \sigma = 400-10cm^{-1}$).

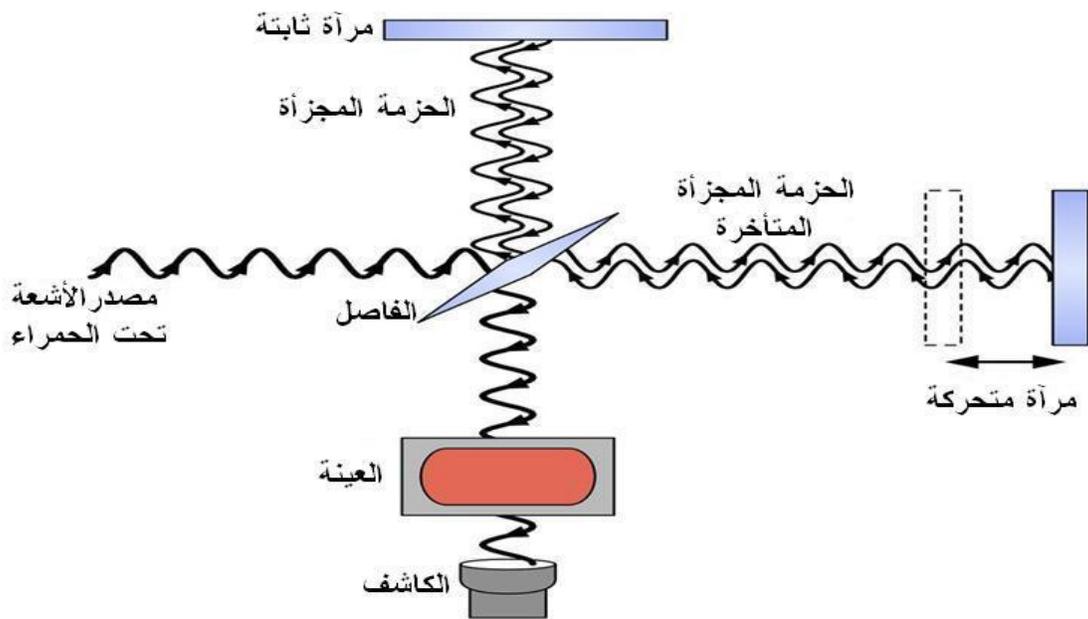
- الأشعة تحت الحمراء المتوسطة ($\lambda = 25-2.5\mu m / \sigma = 4000-400cm^{-1}$).

- الأشعة تحت الحمراء القريبة ($\lambda = 2.5-0.8\mu m / \sigma = 14000-4000cm^{-1}$).

عادة ما تستعمل هذه التقنية من أجل تحديد تركيب الطبقات الرقيقة. و يتم ذلك عن طريق الكشف عن

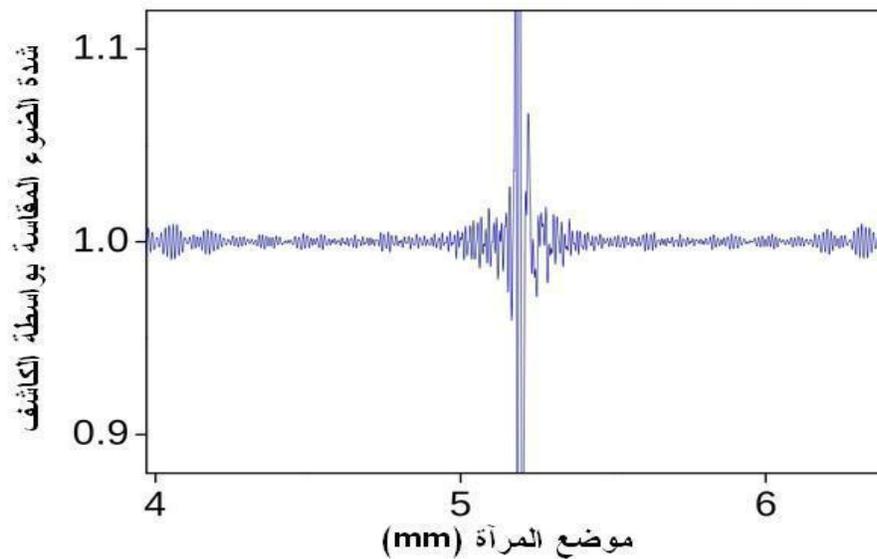
خصائص الاهتزازات للروابط الكيميائية الموجودة واختلافاتها أثناء معالجة المادة.

فعندما يكون الطول الموجي (أو الطاقة)، الذي تقدمه الحزمة الضوئية قريبا من طاقة الاهتزاز للجزيء، سوف يمتص هذا الأخير الإشعاع و نسجل من خلالها انخفاض في شدة الانعكاس أو الإصدار. يتم إجراء التحليل باستخدام جهاز مطيافية تحويل فورييه (الشكل (34)) الذي يرسل للعينة الأشعة تحت الحمراء ويقيس الأطوال الموجية التي امتصت من قبل المادة وشدة الامتصاص.



الشكل (34): رسم تخطيطي لجهاز التداخل لميشلسون مهياً لمطيافية FTIR.

يتم توجيه حزمة الأشعة تحت الحمراء الصادرة من المنبع باتجاه جهاز التداخل لميشلسون الذي سوف يعدل كل طول موجي من الحزمة بتردد مختلف. بعد أن تصل الحزمة الضوئية للفاصل، يتم توجيه نصف الحزمة على المرآة الثابتة، والباقي يمر من خلال الفاصل و يتم توجيهه إلى المرآة المتحركة. بعد ذلك، يحدث انعكاس للحزمتين على المرآتين باتجاه الفاصل لإعادة دمجهما معا فتظهر بذلك تداخلات بناءة أو هدامة تبعا لموضع المرآة المتحركة (الشكل (35)). بعد دمج الحزمتين يتم توجيههما مباشرة نحو العينة لتحديث عمليات الامتصاص داخلها.



الشكل (35): منحنى التداخل عند مخرج الكاشف.

عندما تصل الحزمة للكاشف لتحويلها إلى إشارة كهربائية، تظهر إشارة الكاشف على شكل منحنى التداخل، أي وجود توقيع للشدة بدلالة موضع المرآة. بحيث منحنى التداخل هو عبارة عن مجموع كل ترددات الحزمة. في الأخير يتم تحويل البيانات الخام (منحنى التداخل) بواسطة الحاسوب إلى طيف أشعة تحت الحمراء من خلال عملية حسابية تسمى تحويل فورييه (الشكل (36)).

و بالتالي نحصل على منحنى النفاذية $T(\%)$ بدلالة العدد الموجي $\sigma(\text{cm}^{-1})$ ، بحيث يعبر عن النفاذية على أنها النسبة بين شدة الحزمة الصادرة عن العينة I و شدة الحزمة الواردة I_0 و نكتب :

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (53)$$

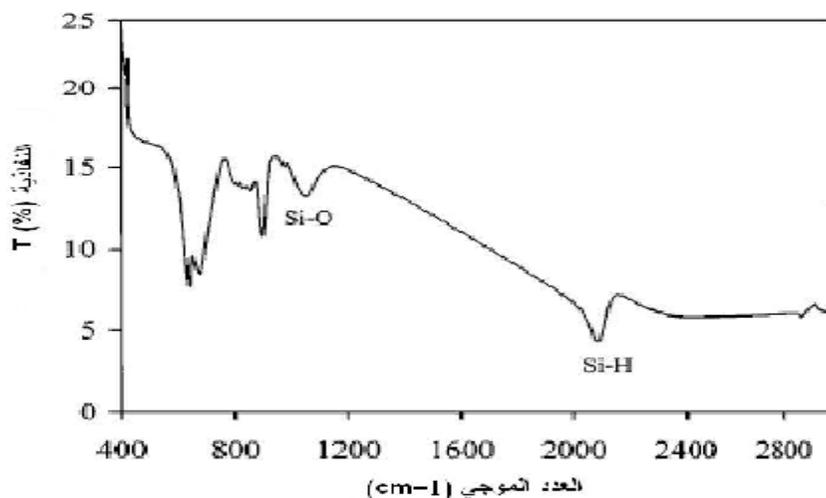
$$s = \frac{1}{l} \quad (54) \quad \text{مع العلم أن :}$$

حيث λ الطول الموجي (cm) .

$$E = hu = \frac{h C}{\lambda} \quad (55)$$

E : طاقة الفوتون (eV) ، h : ثابت بلانك.

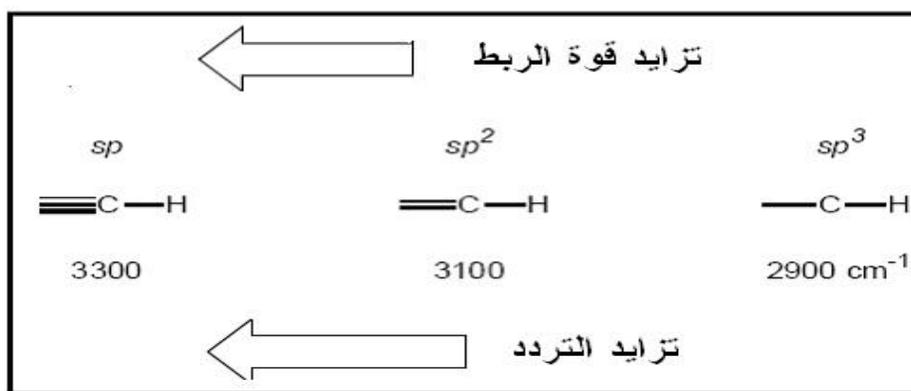
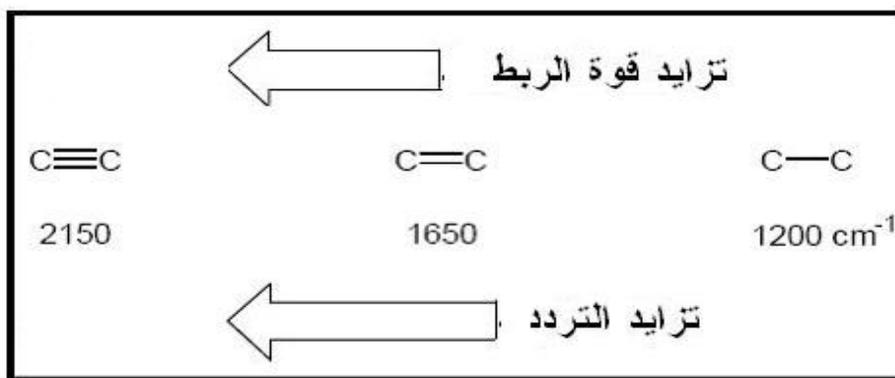
ν : تردد الموجة (Hz)، C : سرعة الضوء.



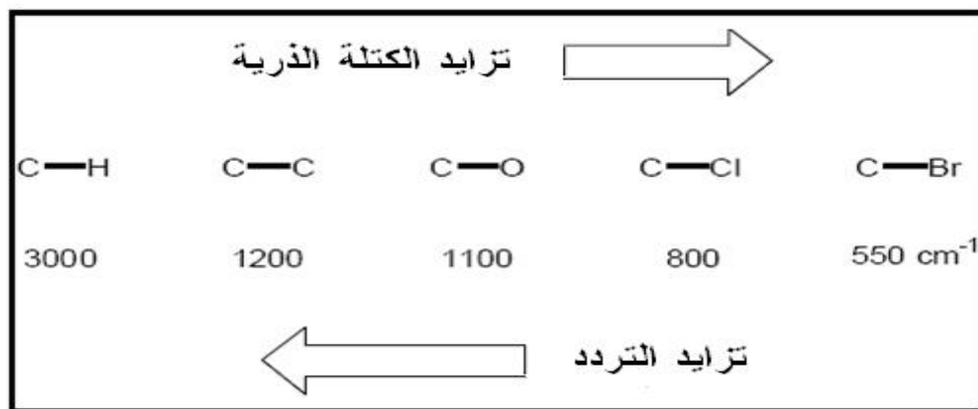
الشكل (36): طيف الامتصاص FTIR حسب المرجع [98].

1-10 أنماط الاهتزاز:

تسمح نظرية الزمر بتحديد أنماط الاهتزازات النشيطة لجزيء ذو هندسة معطاة. بحيث استطاع هرزبرغ حساب هذه الأنماط للاهتزازات من أجل مختلف التناظرات للجزيات [99]. لقد وجد بأن موضع النطاقات يتعلق بطاقة الربط (الشكل(37)) و الكهروسلبية للذرات و كذلك بكتلتها(الشكل(38)). أما في حالة الاهتزاز لرابطة مستقطبة، سوف يعطي نطاقات أكثر شدة. و فيما يخص الرابطة غير المستقطبة سوف تكون قليلة الشدة أو غير مرئية.



الشكل (37): رسم بياني يوضح تأثير قوة الرابطة على نمط الاهتزاز.

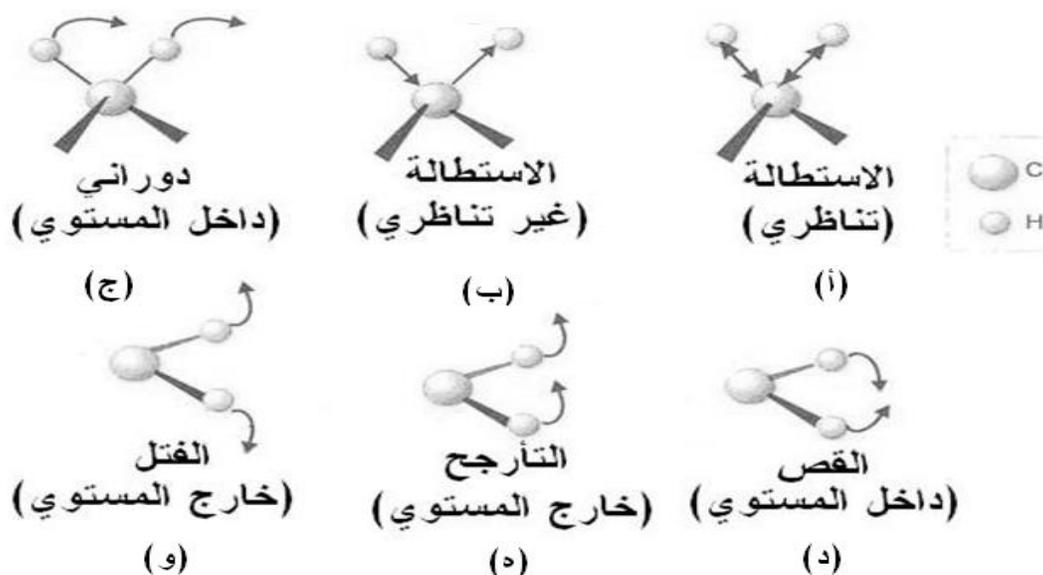


الشكل (38): رسم بياني يوضح تأثير كتلة الذرات على نمط الاهتزاز.

يوجد عدة أنماط للاهتزاز بدلالة الروابط، إذ تفسر أي طيف متحصل عليه [100] (الشكل(39)):

- الاستطالة أو التمدد (stretching) يوافق تغير في طول الرابطة من أجل ثلاث ذرات ليست في اتجاه واحد، يوجد نمطين أحدهما تناظري(الشكل(39-أ)) و الآخر غير تناظري(الشكل(39-ب)).

- الانحناء (bending) يوجد نمطين في حالة التشوه داخل المستوي أحدهما نمط دوراني (rocking) (الشكل(39-ج)) و الآخر نمط القص (scissoring) (الشكل(39-د)). و يوجد نمطين في حالة التشوه خارج المستوي أحدهما نمط التآرجح (wagging) (الشكل(39-هـ)) أما الآخر فهو نمط الفتل (twisting) (الشكل(39-و)).

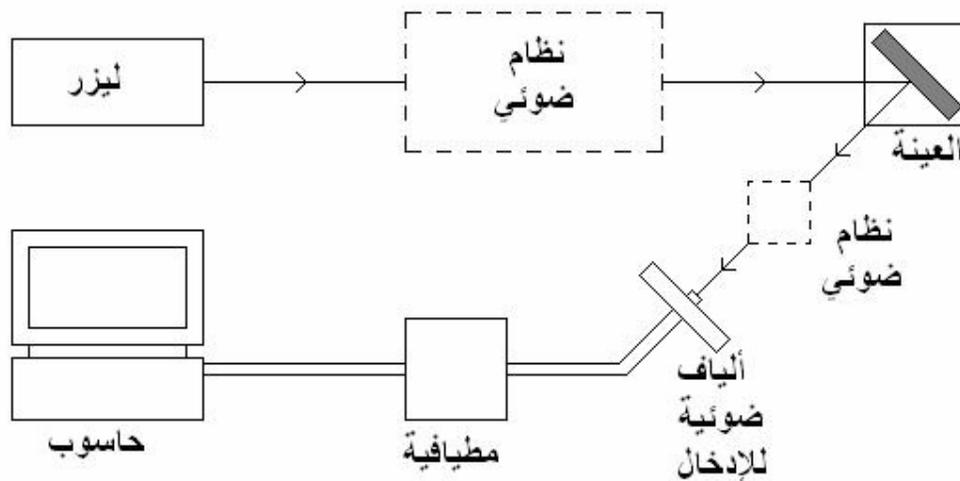


الشكل (39): رسم بياني يوضح اهتزازات الاستطالة و التشوهات [100].

11- مطيافية التآلق الضوئي PL :

مطيافية التآلق الضوئي (La Spectroscopie de Photoluminescence) هي تقنية بصرية تسمح بتحديد خصائص المواد شبه الموصلة و العازلة بحيث يمكن استخدامها لدراسة تكوين الحزم الطاقية لهذه المواد ، بالإضافة إلى مستوياتها من الشوائب. يستند مبدأ عمل هذه التقنية على إثارة إلكترونات المادة المدروسة باستخدام شعاع ضوئي (عادة أحادي اللون) و الكشف عن الضوء المنبعث من هذه المادة (الشكل(40)).

بشكل عام، طاقة الضوء تكون جد ضعيفة مقارنة بالإشعاع المستخدم في الإثارة، وهو ما يعني أنه من الضروري استخدام ليزر كمصدر للإثارة ونظام كشف ذو كفاءة عالية و هذا من أجل المواد الصلبة.



الشكل (40): مخطط للجهاز التجريبي الخاص بمطيافية التآلق الضوئي[101].

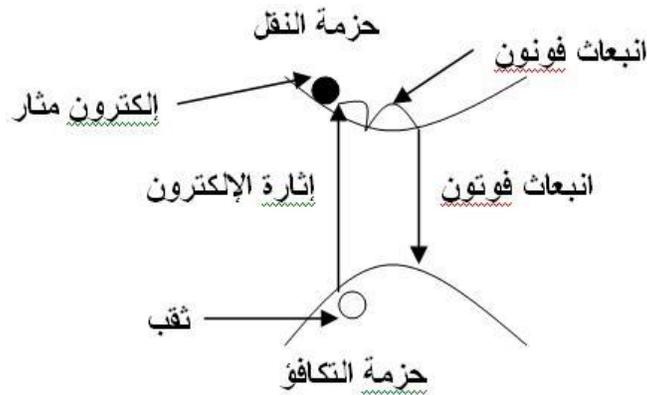
خلال إثارة إلكترونات المادة، تمر الإلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة النقل. ثم بعد ذلك، تعاود النزول بسرعة إلى حزمة التكافؤ مع انبعاث الفونونات (الحرارة) تتبعها فوتونات و ذلك أثناء العودة إلى حزمة التكافؤ (الشكل(41)).

انبعاث الفونون هو عملية سريعة للغاية من رتبة بيكو ثانية، عكس ذلك فإن انبعاث الفوتون يمكن أن يأخذ 10^{-9} ثانية و يصل إلى عدة ثوان (باستثناء المواد الفسفورية، يكون زمن الانبعاث من بعض الملي ثانية). يعبر عن معامل الانبعاث بالشكل التالي :

$$L = B (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (56)$$

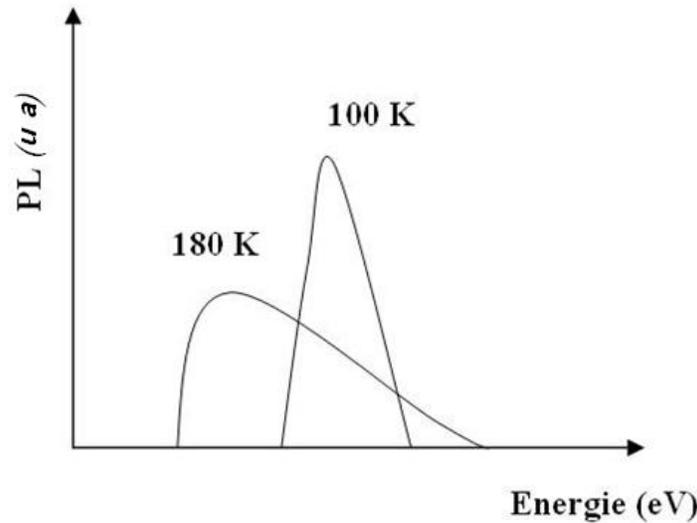
حيث B ثابت.

نلاحظ بأن الانتقال حزمة-حزمة تمتلك عتبة تقع في $h\nu = E_g$.



الشكل (41): مخطط يبين ظاهرة التألق الضوئي.

تدريجياً، كلما زادت درجة الحرارة، كلما بدأت الحالات المتوقعة في أعلى مستوى في الحزمة الطاقية باحتلالها، وهي تسهم في انبعاث الإشعاع، وبالتالي يترتب على ذلك انتقال يمتلك ذيل من جهة الطاقات العالية. وهي تتغير بشكل سريع مع درجة الحرارة (الشكل (42)).

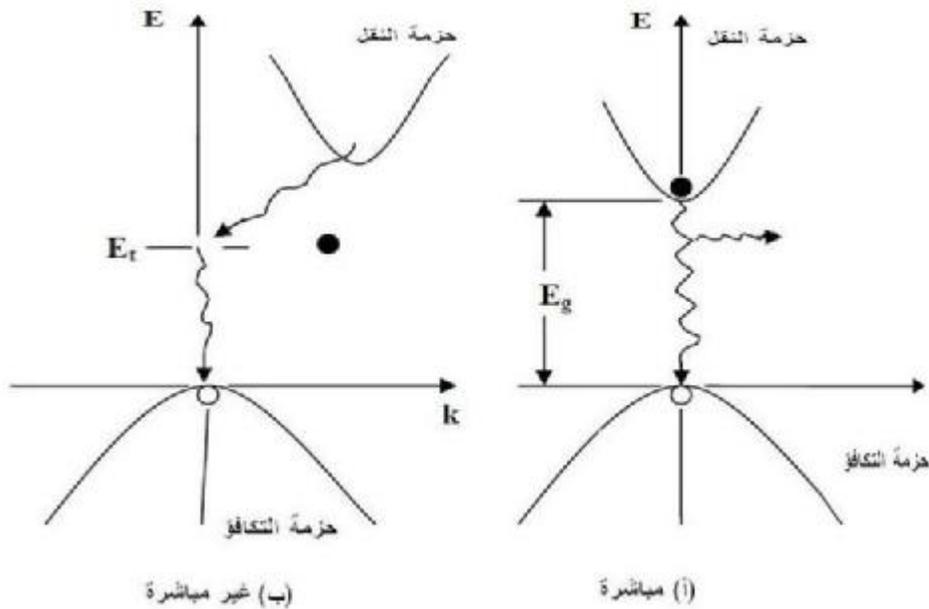


الشكل(42): رسم بياني يمثل تغير التآلق الضوئي بدلالة الطاقة.

إن ظاهرة التآلق في أنصاف النواقل تكون في الغالب نتيجة لعملية إعادة اتحاد مشع لزوج من النوع إلكترون - ثقب. تكون طاقة الفوتون مساوية للطاقة المحررة أثناء عملية إعادة الإتحاد. و بما أن الشعاع الموجي الخطي للفوتون مهمل، فلذلك يتطلب إصداره إما إعادة اتحاد مباشرة أو توليد (امتصاص) للفونون لتحقيق قانون انحفاظ الشعاع الموجي. و على هذا الأساس تقسم أنصاف النواقل إلى مجموعتين متميزتين بحسب طبيعة فجوة حزمة الطاقة لكل منها، و هما كما هو مبين في الشكل(43): (أ) أنصاف نواقل ذات فجوة طاقة مباشرة، (ب) أنصاف نواقل ذات فجوة طاقة غير مباشرة.

تكون في أنصاف النواقل ذات الفجوة المباشرة أعلى حالة تكافؤ مشغولة بالإلكترونات و أدنى حالة ناقليّة شاغرة عند نفس النقطة (غالبا عند النقطة $K=0$) كما هو موضح بيانيًا في الشكل(43-أ). حيث موقع النهاية الصغرى لمنحنى حزمة النقل منطبق مع موقع النهاية العظمى لمنحنى حزمة التكافؤ في فضاء العدد الموجي $K [102]$. بينما في المواد ذات فجوة الطاقة غير المباشرة مثل السليكون فإنهما

غير منطبقين كما هو واضح في الشكل (43-ب). وبالتالي في حالة أنصاف النواقل ذات الفجوة المباشرة مثل GaAs يمكن للإلكترون من حزمة النقل أن ينتقل إلى حالة شاغرة في عصابة التكافؤ بدون أي تغيير في قيمة K محرراً فرق الطاقة E_g بشكل فوتون ضوئي [103]. و عملية الانتقال هذه هي بشكل عام عملية سريعة جداً و تتصف بعمر متوسط من رتبة 10^{-8} s. بينما يتطلب مثل هذا الانتقال، في حالة السليكون، بعض التغير في قيمة K . و بالتالي، لا يمكن للإلكترون من حزمة النقل أن ينتقل مباشرة إلى عصابة التكافؤ بدون حدوث تغيير في شعاعه الموجي و بالتالي طاقته. فعلى سبيل المثال، يمكن للإلكترون أن ينتقل إلى حزمة التكافؤ عبر حالة عيب E_t في فجوة الطاقة. و يستهلك الجزء الأكبر من الطاقة المتحررة، في هذه الحالة، بشكل حرارة تمتصها الشبكة مولدة بالتالي فونوناً. بينما يمكن للجزء الضئيل المتبقي من الطاقة أن يساهم في إصدار الفوتون الضوئي.

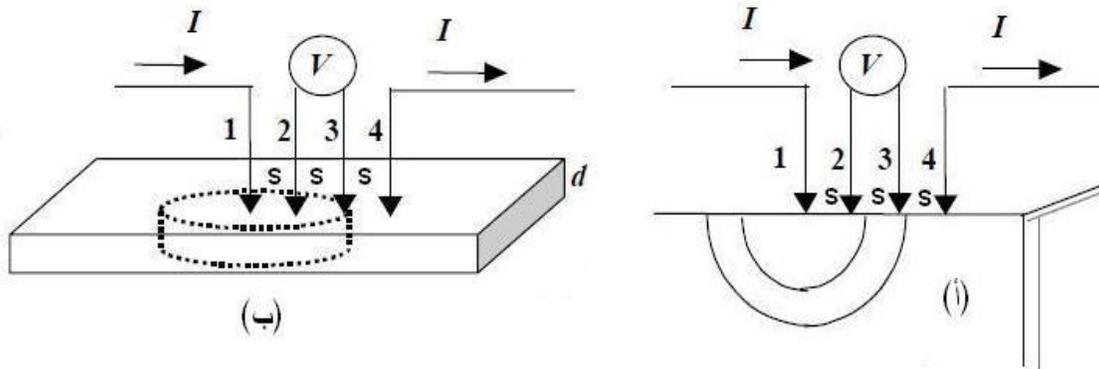


الشكل (43): رسم بياني يمثل فجوة حزمة الطاقة [104].

و هذا يعني أن عملية إعادة الإتحاد المشع في السليكون تتطلب تحرير فونون مما ينقص بشكل كبير احتمال و معدل هذه العملية. هذا يؤدي إلى عمر زمن للإشعاع من رتبة 10ms [105] و هو أكبر بكثير من عمر الإشعاع في حالة أنصاف النواقل ذات الفجوة المباشرة 10ns .

12- تقنية الأربع نقاط لقياس المقاومة النوعية :

تستخدم تقنية الأربع نقاط عادة لقياس الناقلية الكهربائية لشرائح رقيقة. بحيث يمكننا من قياس المقاومة الكهربائية النوعية بسرعة و لجميع أنواع أشباه الموصلات. إنها تطبق بشكل جيد على طبقات مزروعة بالقرب من السطح. ومع ذلك، فمن أجل الحصول على نتائج موثوقة، لا بد من أن تكون الطبقة المزروعة معزولة كهربائياً عن بقية العينة. مبدأ عمل هذه التقنية بسيط (الشكل (44))، بحيث يتكون الجهاز من أربعة مسامير معدنية (سبائك التنغستن) موجهة و متباعدة عن بعضها البعض بنفس المسافة S (حوالي 1mm).



الشكل (44): مبدأ قياس المقاومة النوعية لطبقة رقيقة بواسطة طريقة أربع نقاط.

خلال قياس المقاومة النوعية، الأربيع نقاط تضغط حتى تلامس سطح الطبقة. بحيث يتم استخدام المسمارين الخارجيين في إدخال التيار الكهربائي. أما بالنسبة إلى المسمارين الداخليين، فهي تستخدم في قياس فرق الجهد. التيار المطبق على سطح الطبقة الموصلة ينتشر تناظريا و بشكل قطري في كل الاتجاهات (الشكل (44-أ)). أما بالنسبة للجهد المتساوي الذي يحدث في الطبقات الرقيقة (عمق d)، فهو اسطواني (الشكل (44-ب)). في حالة النقاط الموجهة و المتساوية المسافة، الناقلية σ (أو المقاومة ρ) تعطى بالعلاقة التالية :

$$s = \frac{1}{r} = 0.22 \left(\frac{I}{V} \right) \frac{1}{e} \quad (57)$$

حيث :

e : سمك الطبقة الناقلة.

I : شدة التيار و V : فرق الجهد.

في حالة طبقات مطعمة (أو مزروعة) بانتظام، النسبة بين الجهد و شدة التيار هي متناسبة مباشرة مع المقاومة المربعة لهذه الطبقة. فإذا كان سمك هذه الطبقة e أصغر بكثير من المسافة S ($e \ll S$)، فإن المقاومة المربعة (R_C) مرتبطة بالمقاومية (ρ) وذلك بالعلاقة التالية :

$$R_C = \frac{r}{e} = \frac{\rho}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right) = 4.53 \left(\frac{V}{I} \right) \quad (58)$$

13- خاتمة جزئية:

في سياق هذا الفصل، قمنا بإعطاء نظرة عامة حول المبدأ الفيزيائي و الخصائص المميزة لكل التقنيات التجريبية المستعملة في هذا العمل من أجل تحليل العينات. في أول الأمر قدمنا لمحة عن تقنية RBS التجريبية المستعملة من أجل تحليل مجموعة من العينات. بحيث أعطينا نظرة عامة حول المبدأ الفيزيائي لهذه التقنية في حالة استعمال الهندستين العشوائية و الموجهة. بعد ذلك تطرقنا إلى مطيافية انعراج الأشعة السينية (DRX)، ثم انتقلنا لحالة مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR)، و في الأخير انتهينا بتقنية مطيافية التآلق الضوئي (PL) دون أن ننسى تقنية الأربع نقاط لقياس المقاومة (quatre points).

الفصل الثالث

محاكاة التفاعل أيون-مادة أثناء

عملية الزرع الأيوني

1- مقدمة:

في سياق هذا الفصل سوف نقوم بمحاكاة زرع أيونات الأنتيموان أو الزرنيخ في الهدف Si بواسطة برنامجين، يعتمدان على تقريب التصادمات الثنائية BCA، و هذا من أجل التنبؤ بأهم الظواهر الفيزيائية الخاصة بالتفاعل أيون-مادة. البرنامج الأول هو SRIM الذي يحاكي تفاعل الأيونات مع المادة غير المبلورة. أما البرنامج الثاني فهو CRYTAL-TRIM الذي يحاكي تفاعل الأيونات مع المادة المبلورة. هذان البرنامجان 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 تأثير توجيه حزمة الأيونات بالنسبة إلى سطح الهدف في الحالتين (مبلور و غير مبلور).

2- محاكاة التفاعل أيون-مادة و التنبؤ بالمعاملات الخاصة بالزرع الأيوني :**2-1 استعمال برنامج SRIM :****2-1-1 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 الأنتيموان أو الزرنيخ مع هدف من السليكون، اتخذنا الشروط الموضحة في الجدول (2). فيما يتعلق بتوجيه الهدف بالنسبة لحزمة الأيونات، استخدمنا الحالتين الأكثر شيوعا في زرع الأيونات وهما 0° و 7° . وأخيرا، لا بد من الإشارة إلى أن برنامج SRIM يعتبر الهدف غير المبلور فقط.

سمك الهدف (Å)	الهدف	عدد الايونات	زاوية الزرع (°)		طاقة الزرع (keV)	الجرعة (Ion/cm ²)		الأيون
1600	Si	99999	7	0	120	1.6E15	1E15	Sb ⁺
2000					100	1.5E16		As ⁺

الجدول(2): الشروط المستعملة في برنامج SRIM من أجل المحاكاة.

2-1-2 دراسة قدرة توقف أيوني Sb⁺ و As⁺ في السليكون كهدف :

انطلاقاً من الشكل (45) الذي يمثل تغيرات ضياع الطاقة الالكترونية و النووية لأيونات الزرنينج بدلالة الطاقة الواردة، نميز عدة مجالات :

بالنسبة لأيونات الزرنينج من أجل طاقات التسريع الأقل من النقطة الحرجة 800keV، نلاحظ بأن قدرة التوقف النووية الناتجة عن التصادمات المرنة بين الأيون و ذرات الهدف هي السائدة.

بالإضافة إلى ذلك، فإنه يصل إلى قيمة قصوى عند 75keV و التي توافق فقدان للطاقة

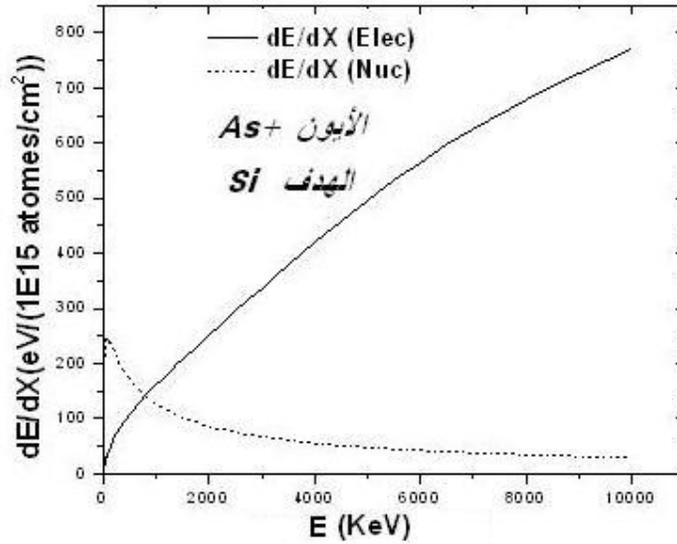
مقداره $250 \text{ eV}/1\text{E}15 \text{ atomes}/\text{cm}^2$.

انطلاقاً من 800keV، يصبح الكبح ذو أصل الكتروني هو السائد مقارنة بالتوقف النووي. هذا الكبح الإلكتروني يعبر عن التفاعل غير المرن بين الأيونات و الإلكترونات المدارية لذرات الهدف و هو المسؤول عن إثارة وتأيين ذرات الهدف. أما عند النقطة الحرجة، فيتم كبح أيونات الزرنينج بواسطة الأليتان على حد سواء. نذكر بأن كمية الطاقة المحولة خلال كل تصادم هي جزء صغير جداً من الطاقة الحركية للجسيمات الواردة.

بالنسبة لأيونات الأنتيموان، لقد أجرينا دراسة سابقة على قدرة التوقف لهذه الأيونات في هدف من السليكون [106]. من أجل طاقات التسريع الأقل من 2000keV، لاحظنا بأن قدرة التوقف النووية

النتيجة عن التصادمات المرنة بين الأيون و ذرات الهدف هي السائدة. من أجل طاقات التسريع الأكبر من 2000keV يصبح الكبح ذو أصل الكتروني و هو السائد مقارنة بالتوقف النووي. أما عند هذه الطاقة، فيتم كبح أيونات الأنتيموان بواسطة الأليتان على حد سواء.

في الأخير، نستطيع أن نستنتج من خلال الكتلة الذرية و طاقة الورود للأنتيموان (120keV,121.760g/mol) و الزرنيخ (100keV,74.921g/mol) بأن قدرة التوقف النووية الناتجة عن التصادمات المرنة مع ذرات الهدف Si هي السائدة و هذا ما يوافق المراجع [38-36].

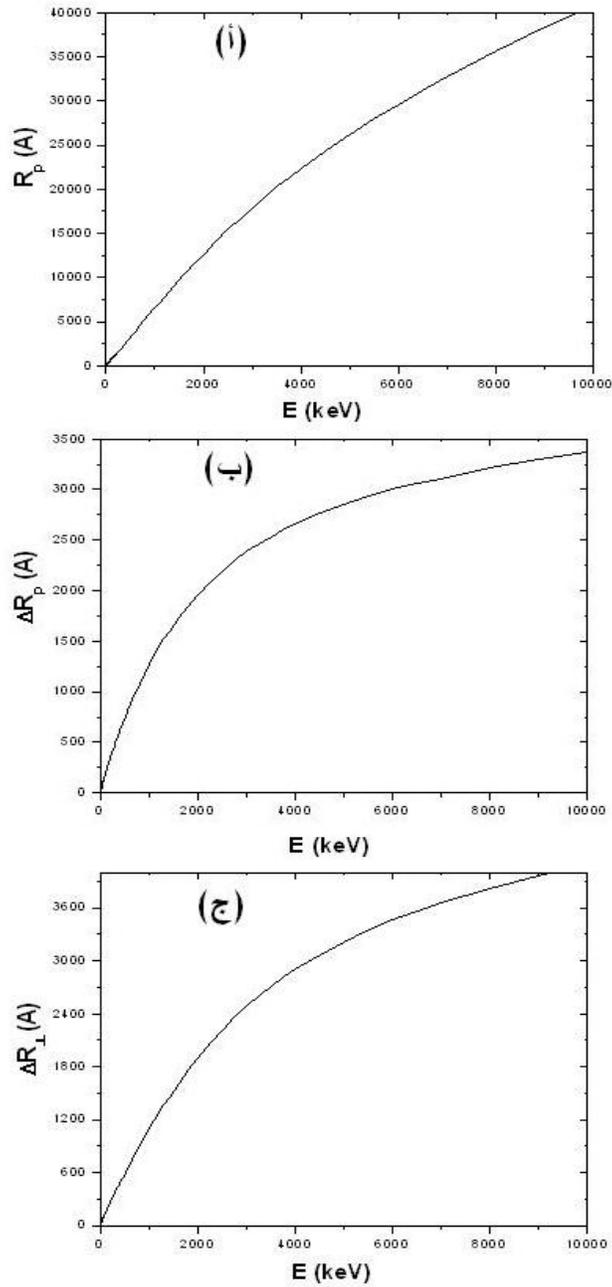


الشكل (45): محاكاة قدرة التوقف النووي و الالكتروني (ببرنامج SRIM) لأيونات As^+ في الهدف

Si بدلالة طاقة الورود للأيونات.

2-1-3 تأثير طاقة الزرع على معاملات توزيع الأيونات داخل الهدف :

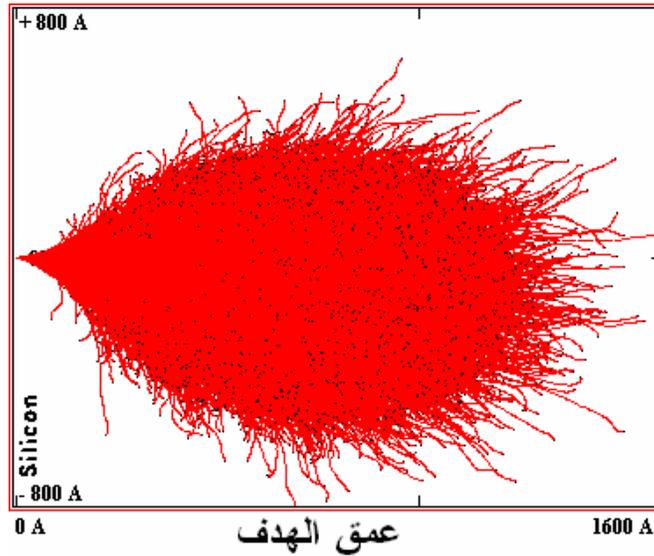
في هذه المرحلة، اهتمنا بدراسة تأثير الطاقة الواردة للأيونات As^+ على معاملات الزرع الأيوني. فمن الواضح في الشكل (46) أنه كلما كانت طاقة التسريع جد عالية كلما كانت القيم المتحصل عليها جد مهمة. فوفقا لتكنولوجيا الدوائر المدمجة فإنها تتطلب التقليل منها، و منه نستنتج أن الطاقات المنخفضة تعطي أفضل النتائج [107]. و هذا ما يبرر اختيارنا لقيمة الطاقة $120keV$ بالنسبة للأنتموان و $100keV$ بالنسبة للزرنوخ التي استخدمناها في الجزء التجريبي. بالنسبة للأيونات الأنتموان المزروعة في هدف من السليكون ، فقد أجرينا دراسة سابقة لتأثير الطاقة الواردة على معاملات الزرع الأيوني و هي موضحة في المرجع [106].



الشكل (46): رسم بياني يمثل نتائج المحاكاة ببرنامج SRIM و الذي يوضح تأثير طاقة تسريع الأيونات (As^+) على : (أ) المسار المسقط R_p ، (ب) الانحراف القياسي ΔR_p ، (ج) الانحراف القياسي الجانبي ΔR_{\perp} .

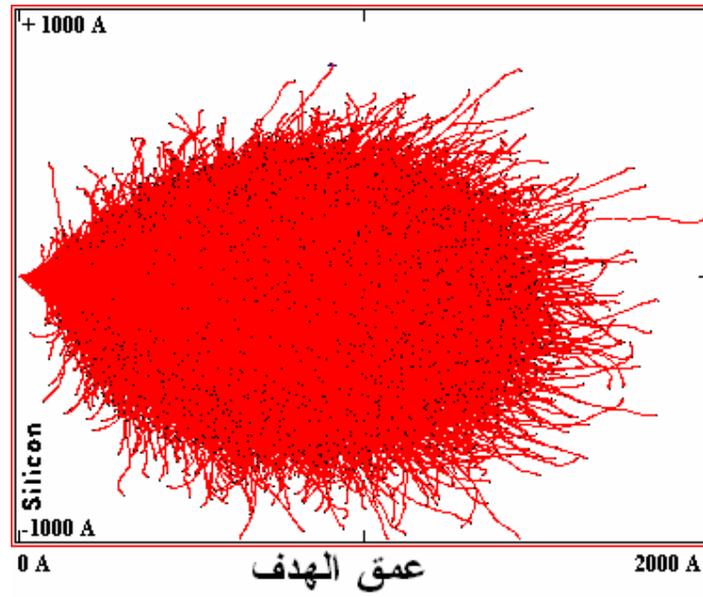
2-1-4 محاكاة توزيع الأيونات داخل الهدف في بعدين:

برنامج SRIM يعطينا محاكاة بالصورة ذات بعدين لمسار و تموضع الأيونات المزروعة في عمق الهدف (الشكل (47) و (48)) و كذلك صورة عن المقطع العرضي له (الشكل (49) و (50)). بحيث يبين مسار الأيونات بخطوط أما الأيونات فهي بنقاط. التوزيع النهائي لكل الأيونات هو على شكل بالون مركزه متواجد على عمق حوالي 630\AA بالنسبة للأنتيموان (710\AA بالنسبة للزرنيخ). نلاحظ أن العمق المحصل عليه بالنسبة للأنتيموان أقل منه بالنسبة للزرنيخ و هذا ناتج لنوعية الأيونات المستعملة. إذ كلما كانت كتلة الأيون صغيرة (بالنسبة لكتلة الهدف)، كلما استطاع أن يتغلغل أكثر في المسند [108،26].

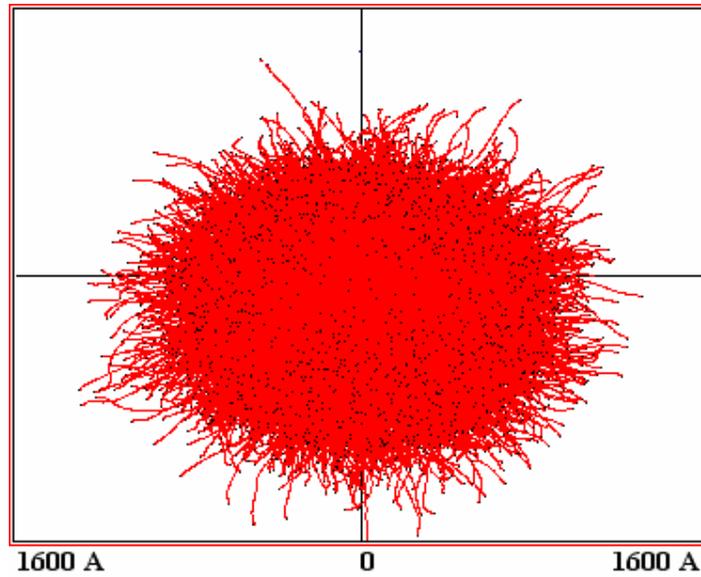


الشكل (47): صورة ذات بعدين، محصل عليها ببرنامج SRIM، تمثل مسار و توزع ذرات Sb

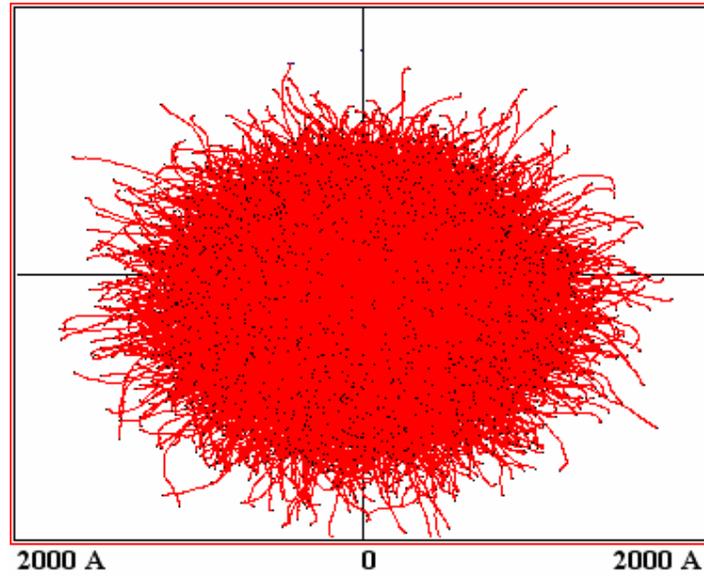
داخل الهدف Si.



الشكل (48): صورة ذات بعدين، محصل عليها ببرنامج SRIM، تمثل مسار و توزع ذرات As داخل الهدف Si.



الشكل (49): صورة ذات بعدين، محصل عليها ببرنامج SRIM، تمثل المقطع العرضي للهدف Si و مسار ذرات Sb بداخله.



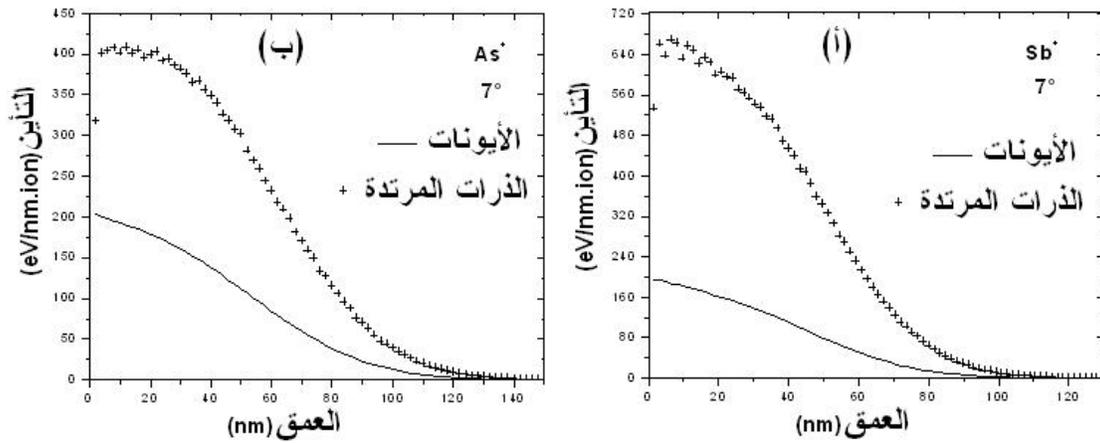
الشكل (50): صورة ذات بعدين، محصل عليها ببرنامج SRIM، تمثل المقطع العرضي للهدف Si و مسار ذرات As بداخله.

2-1-5 محاكاة بعض الظواهر الفيزيائية الخاصة بالتفاعل أيون-مادة :

كما ذكرنا في الفصل الأول، 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.

أ- ظاهرة التأين و الفونونات أثناء الزرع الأيوني:

يصف الشكل(51) ظاهرة التأين في الهدف. و هي ناتجة عن تصادم الأيونات الواردة Sb^+ (الشكل(51-أ)) أو As^+ (الشكل(51-ب)) مع ذرات الهدف Si، مما يؤدي إلى فقدان الكترونات لهذه الأخيرة. بالإضافة إلى ذلك، نلاحظ بأن لذرات الهدف المرتدة تأثير كبير في تأيين الذرات مقارنة بالايونات الأولية.



الشكل (51): رسم بياني محصل عليه ببرنامج SRIM يمثل منحنى تأين ذرات الهدف Si و التي

تنشأ عند تصادم: (أ) أيونات Sb^+ ($E=120keV$) و الذرات المرتدة (ب) أيونات As^+

($E=100keV$) و الذرات المرتدة مع ذرات الهدف.

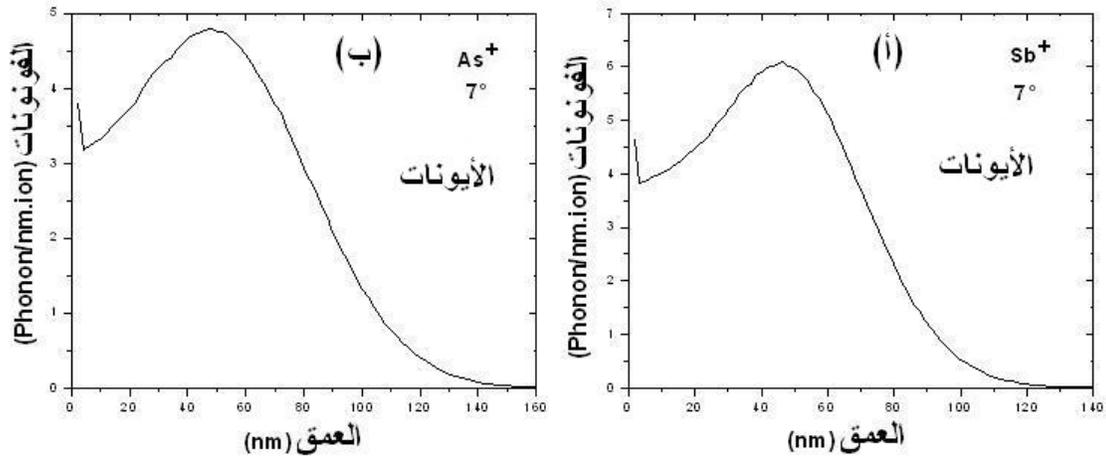
يمثل الشكل (52) توزيع الفونونات التي نشأت من تفاعل الأيونات الواردة Sb^+ (الشكل(52-أ)) أو

As^+ (الشكل(52-ب)) مع ذرات الهدف Si. هذه الفونونات تترجم بواسطة اهتزازات حرارية في

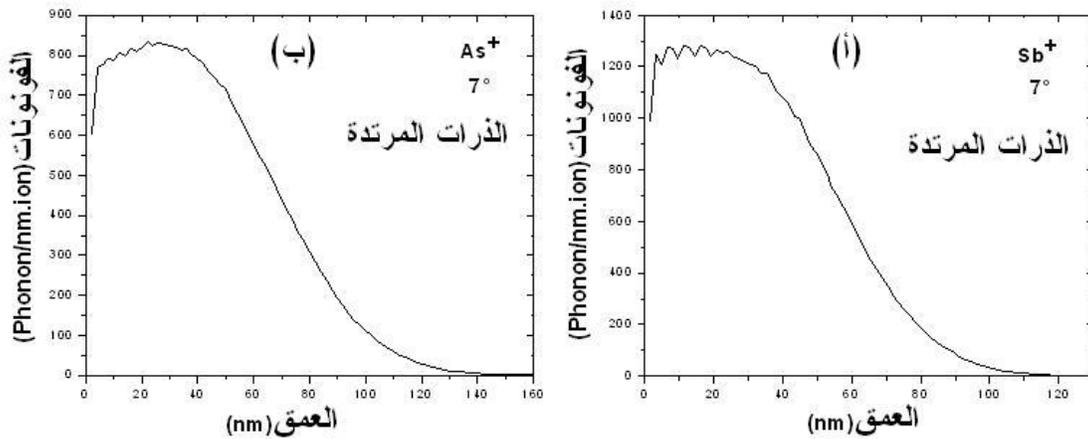
الشبكة البلورية بسبب كون الطاقة المحولة لذرات الهدف أصغر من طاقة العتبة للإزاحة.

بالإضافة إلى ذلك، نلاحظ من خلال الشكل (53)، بأن لذرات الهدف المرتدة تأثير كبير في نشأة

الفونونات في الشبكة مقارنة بالايونات الأولية.



الشكل (52): رسم بياني محصل عليه ببرنامج SRIM يمثل منحني الفونونات لذرات الهدف Si و التي تنشأ عند تصادم: (أ) أيونات Sb^+ ($E=120keV$)، (ب) أيونات As^+ ($E=100keV$) مع ذرات الهدف.



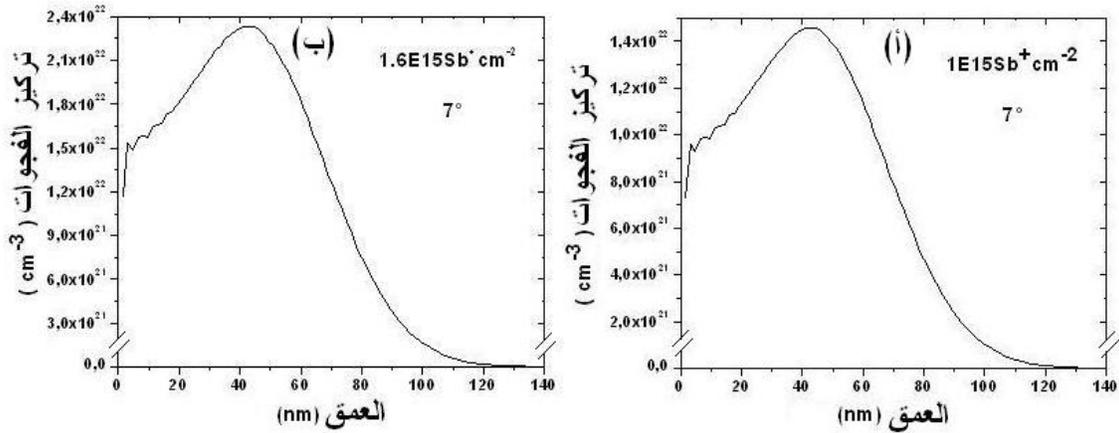
الشكل (53): رسم بياني محصل عليه ببرنامج SRIM يمثل منحني الفونونات لذرات الهدف Si و التي تنشأ عند تصادم الذرات المرتدة مع ذرات الهدف في حالة: (أ) زرع أيونات Sb^+ ($E=120keV$) (ب) زرع أيونات As^+ ($E=100keV$).

ب- نشأة الفجوات في الهدف أثناء الزرع الأيوني :

من خلال الشكلين (54) و (55)، اللذان يمثلان محاكاة توزيع الفجوات الناتجة عن الأيونات الأولية للأنتيموان أو الزرنيخ على التوالي، يمكننا استيعاب التوزيعات المتحصل عليها بواسطة قانون غوصي متمركز بأقصى تركيز على عمق R_D من السطح، و هذا ما يوضحه الجدول(3).

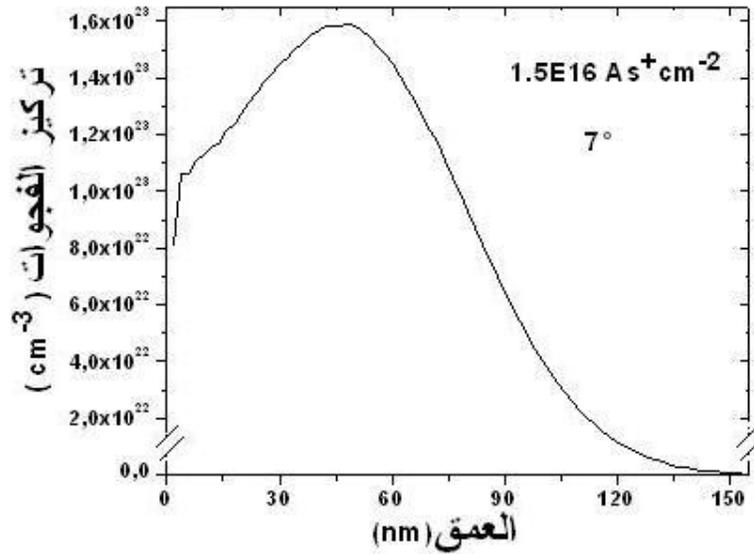
فيما يخص إنشاء الفجوات، إذا كانت الطاقة المحولة لذرة الهدف من قبل الأيونات الواردة أكبر من طاقة العتبة للإزاحة، يتم إخراج ذرة السليكون بعيدا عن موقعها ولا تعود إليه فورا. نلفت النظر بأن قيمة طاقة الإزاحة المسجلة في برنامج SRIM و الخاصة بالسليكون و الجرمانيوم تقدر بـ 15eV .

بالإضافة إلى ذلك، إذا كانت الطاقة المحولة إلى هذه الذرة كبيرة بما فيه الكفاية، فإن ذرة الهدف يمكن بدورها أن تزيج ذرات أخرى للهدف من مواقعها و تسمى بالذرات المرتدة. فيما يخص كثافة الفجوات الناتجة، فإنها تكون أعظمية عندما يكون ضياع الطاقة نووي. يحدث هذا بداية من السطح وحتى العمق R_D و حوله يكون منحنى العيوب غوصي الشكل تقريبا شبيها بمنحنى توزيع الأيونات المزروعة داخل الهدف، و هذه النتيجة موافقة لعدة مراجع [45،34، 110،109].



الشكل (54): رسم بياني محصل عليه ببرنامج SRIM يمثل منحنى انتشار الفجوات (التي تنشأ عند

تصادم أيونات Sb⁺ (E=120keV) مع ذرات الهدف Si) في عمق المسند.



الشكل (55): رسم بياني محصل عليه ببرنامج SRIM يمثل منحنى انتشار الفجوات (التي تنشأ عند

تصادم أيونات As⁺ (E=100keV) مع ذرات الهدف Si) في عمق المسند.

الأيون	الجرعة (Ion/cm ²)	زاوية الزرع (°)	R _D (nm)	تركيز الفجوات (lacune/cm ³)
Sb ⁺	1E15	7	43	1.46E22
	1.6E15		43	2.33E22
As ⁺	1.5E16		46	1.06E23

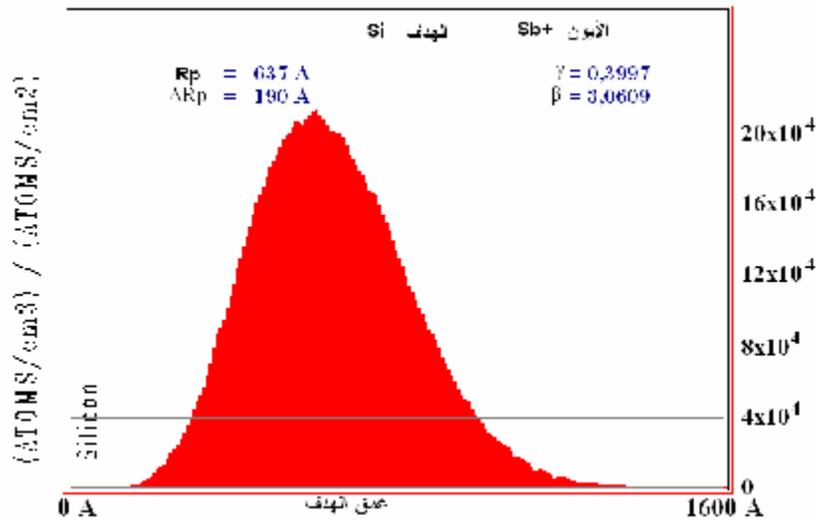
جدول(3): جدول يلخص تقدير أقصى تركيز للفجوات في الهدف Si على عمق R_D.

6-1-2 محاكاة توزيع الأيونات في عمق الهدف:

من خلال الشكلين (56) و (57)، اللذان يبينان توزيع أيونات الأنتيموان أو الزرنيخ في هدف من السليكون، نلاحظ بأن المنحنيين لهما توزيع غوسي. و هذا في توافق جيد مع نظرية L.S.S [37،36،110] ، المنسوبة لاختراق الأيونات للمادة الصلبة غير المبلورة. منحني الشكل (56)، يظهر ذروة التركيز على عمق يساوي تقريبا 637 Å (بالنسبة للزرنيخ 712Å (الشكل(57))). فيما يخص عرض منتصف الارتفاع، الذي يمثل اتساع المنحنى حول التركيز الأعظمي، حصلنا على 190Å (بالنسبة للزرنيخ 250Å (الشكل(57))). بالإضافة إلى ذلك نستطيع استنتاج أهم المعاملات الخاصة بالزرع الأيوني و هي ملخصة في الجدول (4).

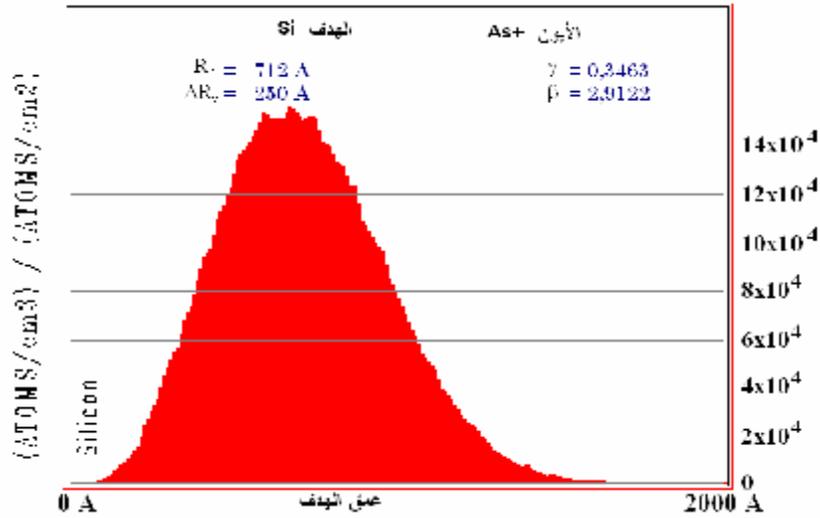
وفيما يتعلق بالعزمين الآخرين وهما الانحراف(الميلان) γ (Skexness) و التفرطح β (Kurtosis) فإنه من الواضح أن قيمتيهما المتحصل عليهما ليست بعيدة عن تلك التي ذكرت في حالة التوزيع الغوسي ($\gamma=0, \beta=3$) [41]. ومع ذلك، فإن الإشارة الموجبة لـ γ تشير إلى أن منحني المحاكاة ليس متناظر كفاية، و بأن ذيل التوزيع مزاح قليلا باتجاه عمق الهدف و التركيز يكون جد مهم باتجاه العمق منه باتجاه السطح و هذا صالح من أجل قذيفة ثقيلة (مثل الأنتيموان و الزرنيخ) في هدف خفيف

(مثل السليكون) [42] (العكس يحدث لما تكون $\gamma < 0$ ، و هذا صالح من أجل قذيفة خفيفة (مثل البور) في هدف ثقيل (مثل السليكون) [42]). من ناحية أخرى، فإن β مختلفة عن القيمة 3 وهذا يعني أن ذروة منحنى التركيز ليست حادة تماما. وعلى الرغم من الإزاحة الطفيفة للتوزيع المحاكى، نستطيع اعتبار منحنى زرع الأيونات Sb^+ في الهدف Si يكون مفضلا وصفه بتوزيع غوسي.



الشكل (56): رسم بياني يمثل نتائج المحاكاة (ببرنامج SRIM) الخاصة بتوزيع الأيونات Sb^+

. في الهدف Si ($E=120keV$)



الشكل (57): رسم بياني يمثل نتائج المحاكاة (ببرنامج SRIM) الخاصة بتوزيع الأيونات As^+ في الهدف Si ($E=100keV$).

الأيون	الجرعة (Ion/cm^2)	زاوية الزرع ($^\circ$)	R_p (nm)	DR_p (nm)	DR_\wedge (nm)	التركيز (Ion/cm^3)
Sb^+	1E15	7	63.7	19.0	16.3	2.11E20
	1.6E15		3.36E20			
As^+	1.5E16		71.7	25.2	18.8	1.55E21

الجدول (4): المعاملات الخاصة بالزرع الأيوني (Sb^+ و As^+ في عينة من Si) و المحصل عليها بالمحاكاة باستعمال البرنامج SRIM.

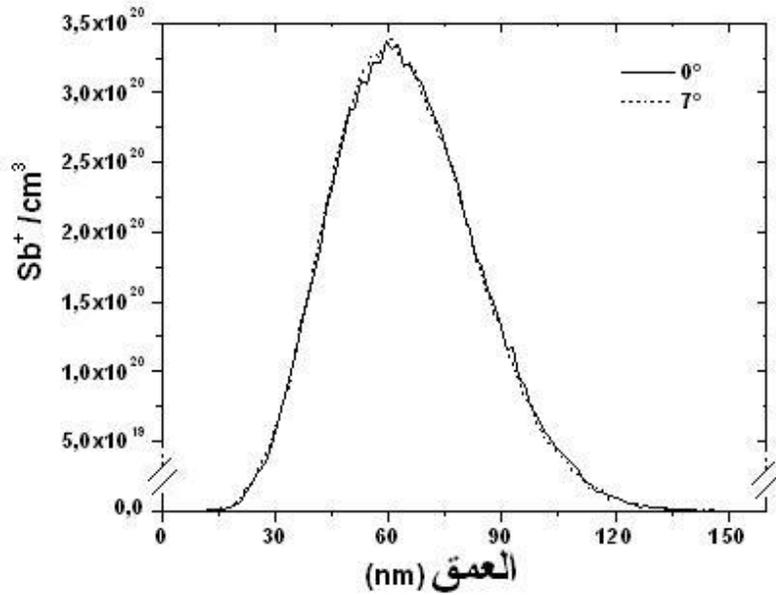
بمقارنة قيم تركيز الفجوات الموضحة في الجدول (2) مع قيم التركيز المستعملة بالنسبة للأنتموان و

الزرنينخ (الجدول (4))، نلاحظ بأن كل أيون مزروع ينشأ 70 فجوة في المسند Si تقريبا.

يتضح جليا من خلال الشكلين (58) و (59) بأن زاوية الزرع ليس لها تأثير على توزيع الأيونات

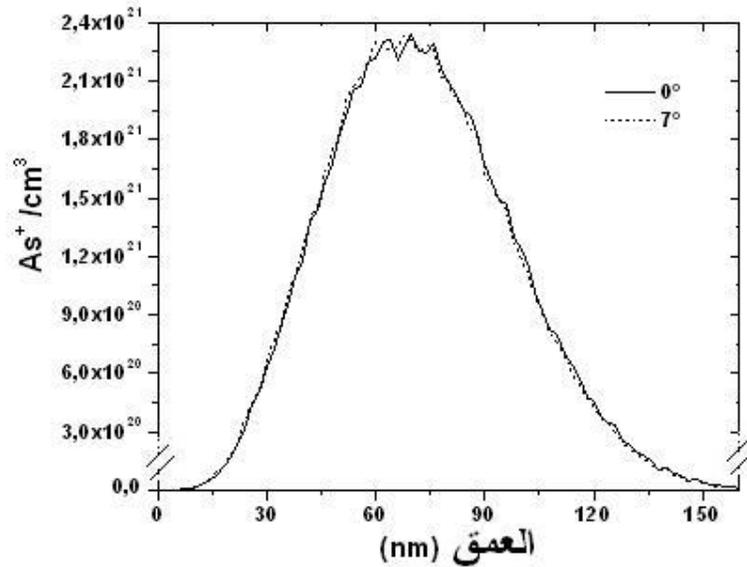
المزروعة داخل الهدف. و هذا راجع إلى أن برنامج SRIM متضمن لنموذج يستعمل لمحاكاة الزرع

الأيوني داخل هدف غير مبلور ولا يأخذ بعين الاعتبار مستوي توجيه سطح العينة [52،53].



الشكل (58): رسم بياني يمثل نتائج المحاكاة (ببرنامج SRIM) الخاصة بمقارنة منحنى توزيع

أيونات Sb^+ ($1.6E15 Sb^+cm^{-2}$ ، $120keV$) داخل الهدف Si بزواوية زرع مختلفة (0° و 7°).



الشكل (59): رسم بياني يمثل نتائج المحاكاة (ببرنامج SRIM) الخاصة بمقارنة منحنى توزيع

أيونات As^+ ($1.5E16 As^+cm^{-2}$ ، $100keV$) داخل الهدف Si بزواوية زرع مختلفة (0° و 7°).

2-2 استعمال برنامج CRYSTAL-TRIM :

1-2-2 الشروط المستعملة في المحاكاة :

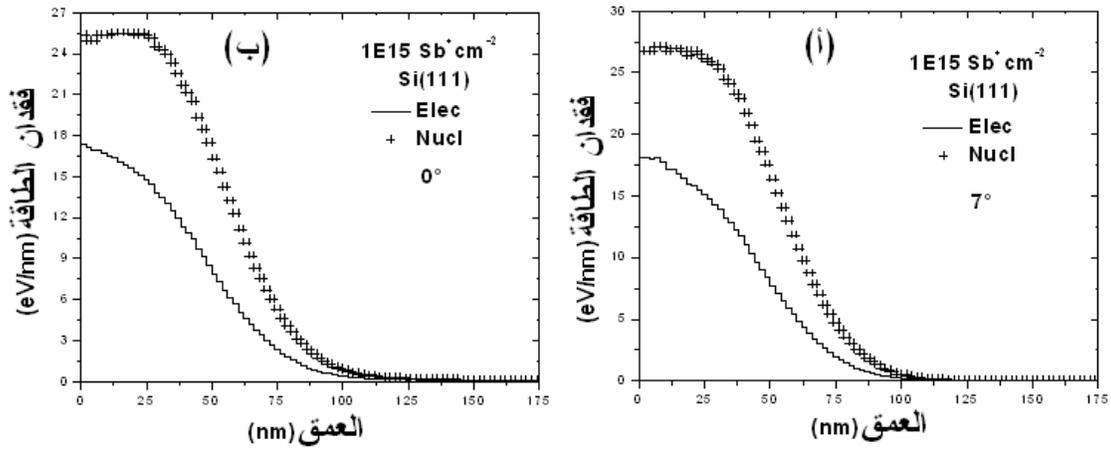
لتنفيذ برنامج C-TRIM من أجل محاكاة تفاعل أيونات الأنتيموان أو الزرنيخ مع هدف من السليكون، اتخذنا الشروط الموضحة في الجدول (5).

سمك الهدف (Å)	الهدف	عدد الايونات	درجة الحرارة (K)	توجيه السطح	زاوية الزرع (°)		طاقة الزرع (keV)		الجرعة (Ion/cm ²)	الأيون
					7	0	120	100		
2500	Si	100000	300	<111>	7	0	120	1.6E15	1E15	Sb ⁺
				<100>			100	1.5E16	As ⁺	

الجدول (5): الشروط المستعملة من أجل المحاكاة ببرنامج C-TRIM.

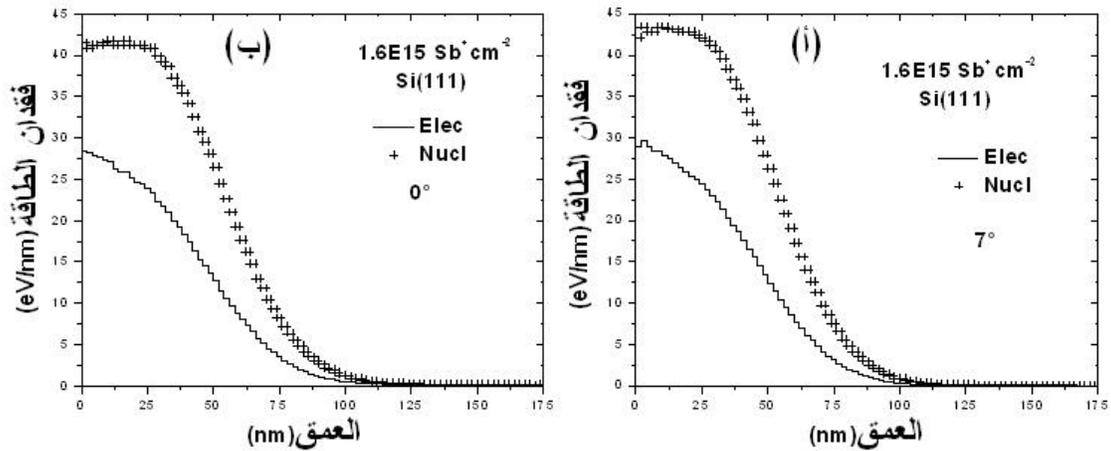
2-2-2 دراسة فقدان الطاقة لأيوني Sb⁺ و As⁺ أثناء زرعها في هدف من السليكون:

انطلاقاً من الأشكال (60-62) التي تمثل تغيرات ضياع الطاقة الالكترونية و النووية لأيونات الأنتيموان (الشكل (60) و (61)) و الزرنيخ (الشكل (62)) بدلالة العمق، نلاحظ بأن قدرة التوقف النووية الناتجة عن التصادمات المرنة بين الأيونات و ذرات الهدف هي السائدة، و ذلك بسبب حجم الأيونات المزروعة مقارنة بالذرة المكونة للهدف.



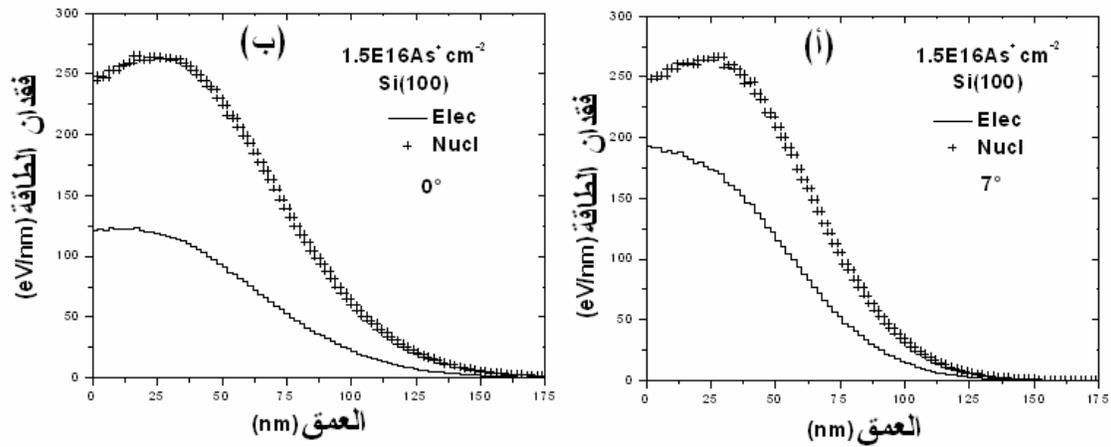
الشكل (60): محاكاة قدرة التوقف النووي و الالكتروني (ببرنامج C-TRIM) لأيونات Sb^+

(E=120keV) في الهدف Si بدلالة العمق.



الشكل (61): محاكاة قدرة التوقف النووي و الالكتروني (ببرنامج C-TRIM) لأيونات Sb^+

(E=120keV) في الهدف Si بدلالة العمق.

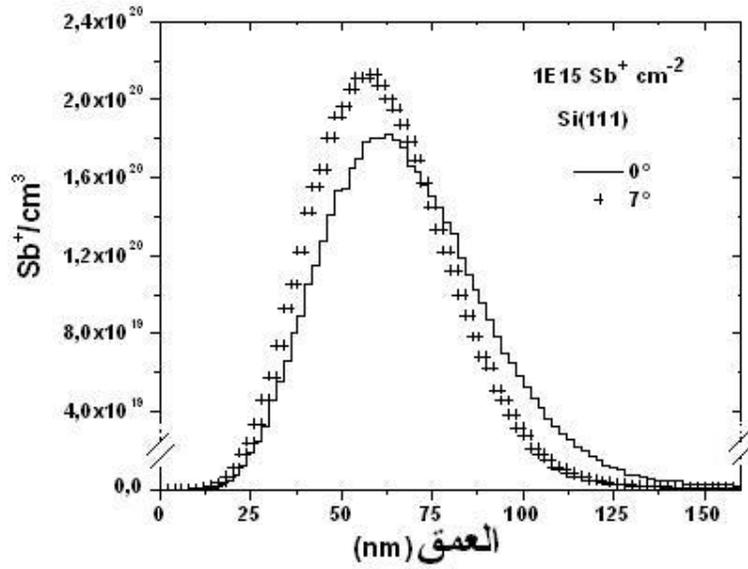


الشكل (62): محاكاة قدرة التوقف النووي و الالكتروني (ببرنامج C-TRIM) لأيونات As^+

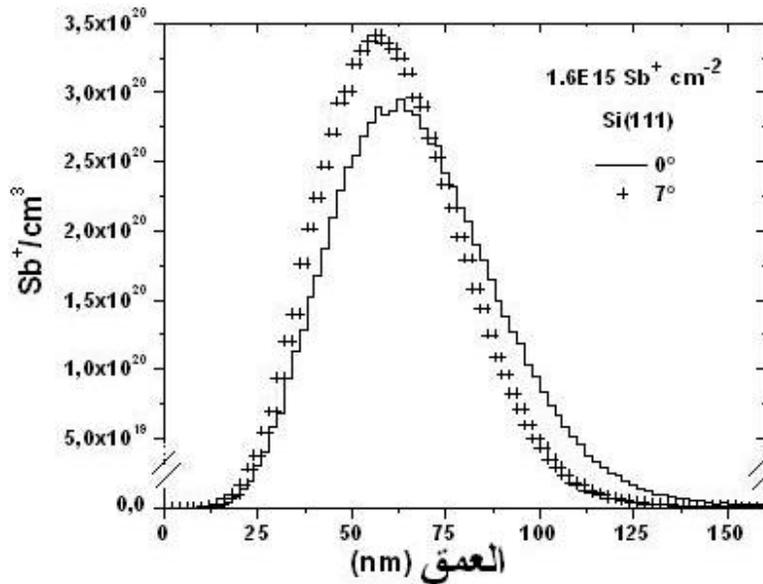
(E=100keV) في الهدف Si بدلالة العمق.

3-2-2 محاكاة توزيع الأيونات و دراسة توجيه الهدف بالنسبة لحزمة الايونات:

من خلال الشكل (63)، نلاحظ بأن المنحنيين ذوي زاوية الزرع المختلفة يمتلكان نفس التوزيع و هو غوصي في هذه الحالة. بالإضافة إلى ذلك، نلاحظ وجود فارق في قيمة ذروة التركيز تقدر بـ $0.33E20 Sb^+.cm^{-3}$ (في الشكل(64) الفارق يقدر بـ $0.51E20 Sb^+.cm^{-3}$) و التي تظهر جليا في ذيل المنحنى و ذلك باتجاه العمق. هذا الاختلاف سببه راجع إلى توازي حزمة الأيونات الواردة مع توجيه سطح العينة $\langle 111 \rangle$ التي تعتبر في هذه الحالة مبلورة، وبالتالي سوف يظهر جزء من الأيونات متوغل في العينة. بحيث هذا التوغل يتعلق بكتلة و طاقة الأيون المزروع [111،107،26].

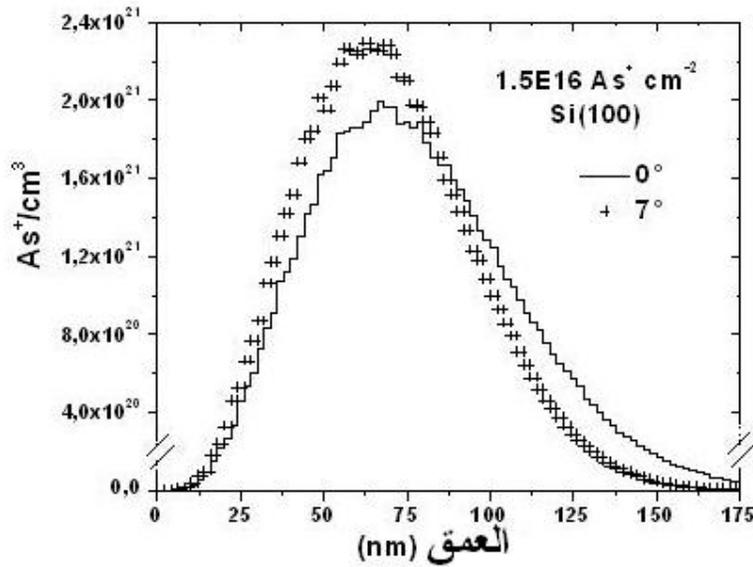


الشكل (63): رسم بياني يمثل نتائج المحاكاة (ببرنامج C-TRIM) الخاصة بمقارنة منحنى توزيع ذرات Sb (120keV ، $1\text{E}15\text{ Sb}^+.\text{cm}^{-2}$) داخل الهدف Si بزواوية زرع مختلفة (0° و 7°).



الشكل (64): رسم بياني يمثل نتائج المحاكاة (ببرنامج C-TRIM) الخاصة بمقارنة منحنى توزيع ذرات Sb (120keV ، $1.6\text{E}15\text{ Sb}^+.\text{cm}^{-2}$) داخل الهدف Si بزواوية زرع مختلفة (0° و 7°).

من خلال الشكل (65)، نلاحظ أيضا وجود فارق في قيمة ذروة التركيز تقدر بـ $0.30E21 \text{ As}^+.\text{cm}^{-3}$ و هذا الاختلاف سببه راجع إلى توازي حزمة الأيونات الواردة مع توجيهه سطح العينة $\langle 100 \rangle$. و هو يظهر جليا في ذيل المنحنى الذي يظهر جزء من الأيونات متوغلة في العينة و ذلك باتجاه العمق و هذا يوافق عدة مراجع [111،107،26].



الشكل (65): رسم بياني يمثل نتائج المحاكاة (ببرنامج C-TRIM) الخاصة بمقارنة منحنى توزيع ذرات As (100keV ، $1.5E16 \text{ As}^+.\text{cm}^{-2}$) داخل الهدف Si بزوايا زرع مختلفة (0° و 7°).

من خلال الأشكال (63)، (64) و (65) نستطيع استنتاج أهم المعاملات الخاصة بالزرع الأيوني و هي ملخصة في الجدول (6).

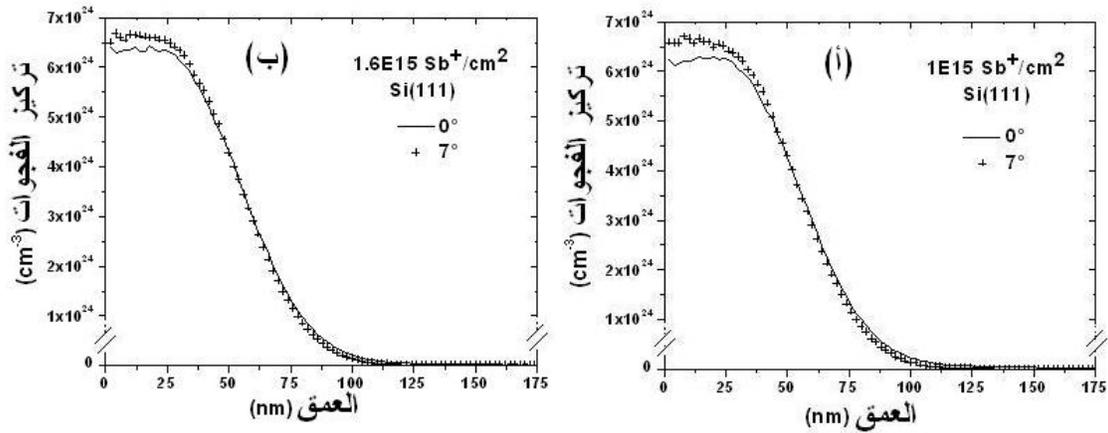
الأيون	الجرعة (Ion/cm ²)	زاوية الزرع (°)	R _P (nm)	DR _P (nm)	DR _^ (nm)	التركيز (Ion/cm ³)
Sb ⁺	1E15	7	62.2	20.9	21.9	2.11E20
	1.6E15		61.9	20.1	21.1	3.41E20
As ⁺	1.5E16		70.0	26.1	27.9	2.26E21

الجدول(6): المعايير الخاصة بالزرع الأيوني للعناصر Sb و As في عينة من Si.

2-2-4 دراسة توزيع العيوب في المادة بعد عملية الزرع:

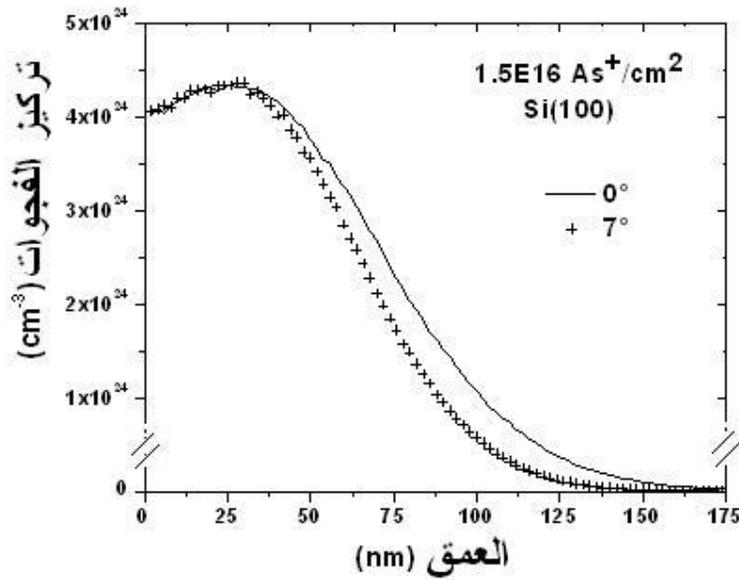
انطلاقاً من الشكلين (66) و (67) نلاحظ بأن العينة تضررت من جراء زرع الأيونات. فمن خلال توزيع العيوب، يتضح لنا بأن المنحنى لا يبدأ من نقطة الصفر و هذا راجع لظاهرة الاقتلاع التي تحدث في السطح لأنها هي الراجحة في حالة العناصر الثقيلة مثل الزرنيخ و الانتيموان [109,45,34].

يمكننا أيضاً استيعاب التوزيعات المتحصل عليها بواسطة قانون غوصي متمركز بأقصى تركيز على عمق R_D من السطح و هذا ما يوضحه الجدول(7). نلاحظ أيضاً بأن العيوب تمتلك تركيز مهم حتى تصل إلى عمق الاختراق R_P (الجدول(6)) بالنسبة للعنصرين المزروعين. بعد هذا العمق، يتناقص تركيز العيوب بطريقة محسوسة و ذلك مرده إلى أن تركيز الأنتيموان أو الزرنيخ عال جداً في هذه المنطقة و هذا ما يحفز تشكيل العيوب [109]. بالإضافة إلى ذلك، نلاحظ تطابق منحنى الفجوات بالنسبة للزاويتين 7° و 0° و الخاص بالعينة المزروعة بالأنتموان (الشكل (66))، بسبب حجم الأيون Sb⁺ الذي هو أكبر من حجم ذرة الهدف Si . أما فيما يخص منحنى الفجوات بالنسبة للزاويتين 7° و 0° و الخاص بالعينة المزروعة بالزرنيخ (الشكل(67))، نلاحظ عدم التطابق في العمق و ذلك راجع ربما لحجم الأيون As⁺ الذي هو قريب نوعاً ما من حجم ذرة الهدف Si مما يجعلها تتغلغل في العمق.



الشكل (66): رسم بياني يمثل نتائج المحاكاة (ببرنامج C-TRIM) الخاصة بمنحنى توزيع الضرر

في الهدف Si(111) من جراء زرع أيونات Sb^+ ($E=120keV$) بزوايا زرع 0° و 7° .



الشكل (67): رسم بياني يمثل نتائج المحاكاة (ببرنامج C-TRIM) الخاصة بمنحنى توزيع الضرر

في الهدف Si(111) من جراء زرع أيونات As^+ ($E=100keV$) بزوايا زرع 0° و 7° .

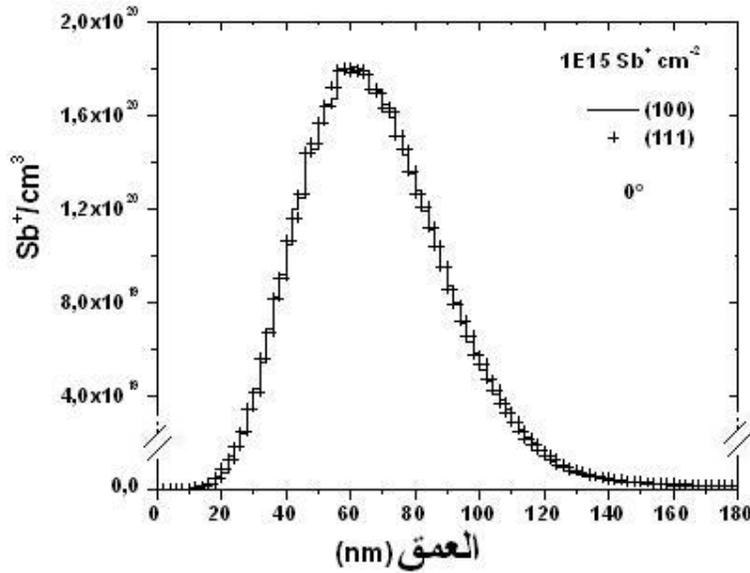
تركيز العيوب (lacune/cm ³)	R _D (nm)	زاوية الزرع (°)	الجرعة (Ion/cm ²)	الأيون
6.49E24	20	7	1E15	Sb ⁺
6.60E24	18		1.6E15	
4.37E24	26		1.5E16	As ⁺

جدول (7): جدول يلخص تقدير أقصى تركيز للفجوات في الهدف Si على عمق R_D من أجل زاوية

الزرع تساوي 7°.

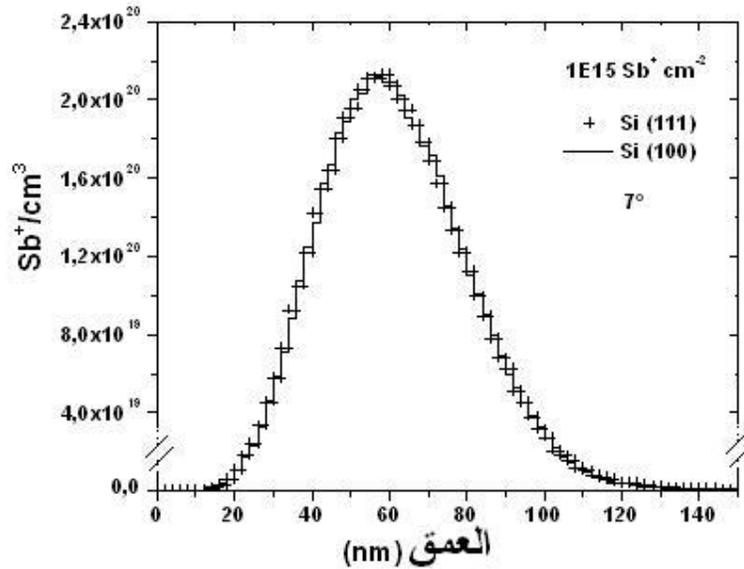
2-2-5 تأثير التوجيه البلوري لسطح الهدف على توزيع الأيونات في المادة:

لقد حصلنا من خلال هذا البرنامج على منحنيات توضح تأثير التوجيه البلوري لسطح الهدف والتي لها أهمية كبيرة في صناعة العناصر الالكترونية (الأشكال (68-71)). وجدنا بأنه لا يوجد اختلاف بالنسبة للتوجيهين و ذلك بسبب كون العنصرين ثقيلين، عكس ما تكون عليه العناصر الخفيفة و التي يكون فيها منحنى التوزيع في الحالة <100> متجها نحو العمق مقارنة بالحالة <111> الذي يمتلك أكثر كثافة من الذرات [112].



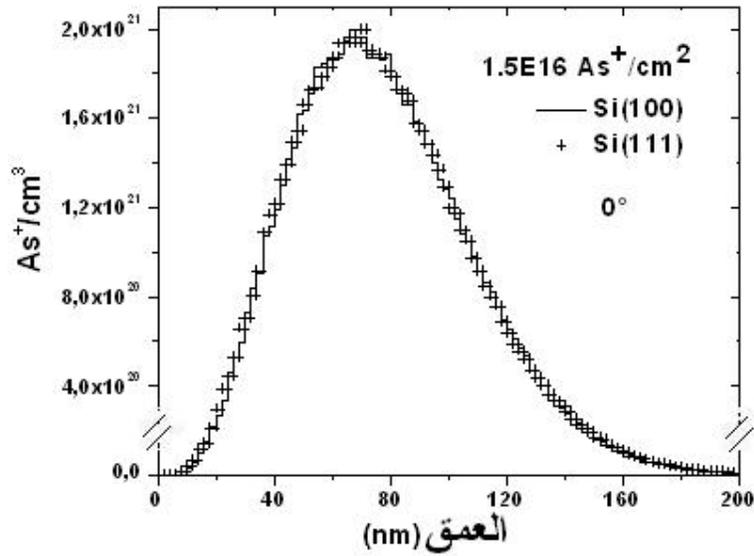
الشكل (68): رسم بياني يمثل نتائج المحاكاة (ببرنامج C-TRIM) الخاصة بمقارنة منحنى توزيع

أيونات Sb^+ داخل الهدف Si بزواوية زرع 0° .



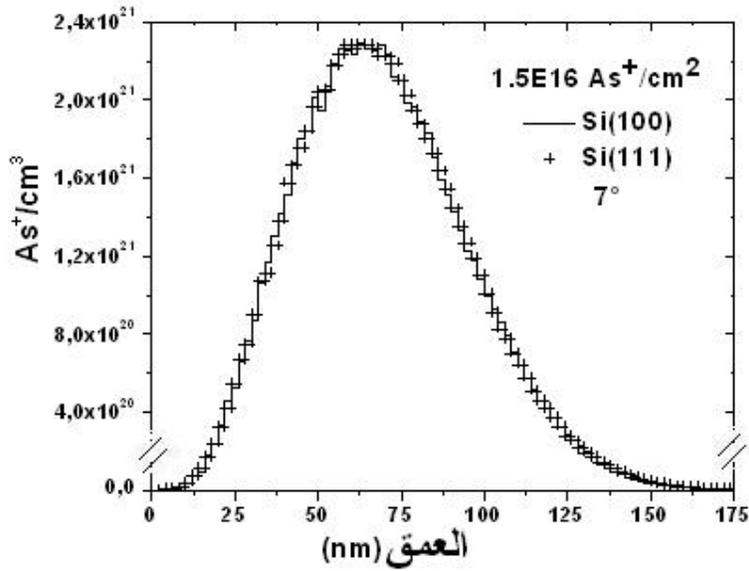
الشكل (69): رسم بياني يمثل نتائج المحاكاة (ببرنامج C-TRIM) الخاصة بمقارنة منحنى توزيع

أيونات Sb^+ داخل الهدف Si بزواوية زرع 7° .



الشكل (70): رسم بياني يمثل نتائج المحاكاة (ببرنامج C-TRIM) الخاصة بمقارنة منحنى توزيع

أيونات As^+ ($100keV$ ، $1.5E16 As^+.cm^{-2}$) داخل الهدف Si بزواوية زرع 0° .



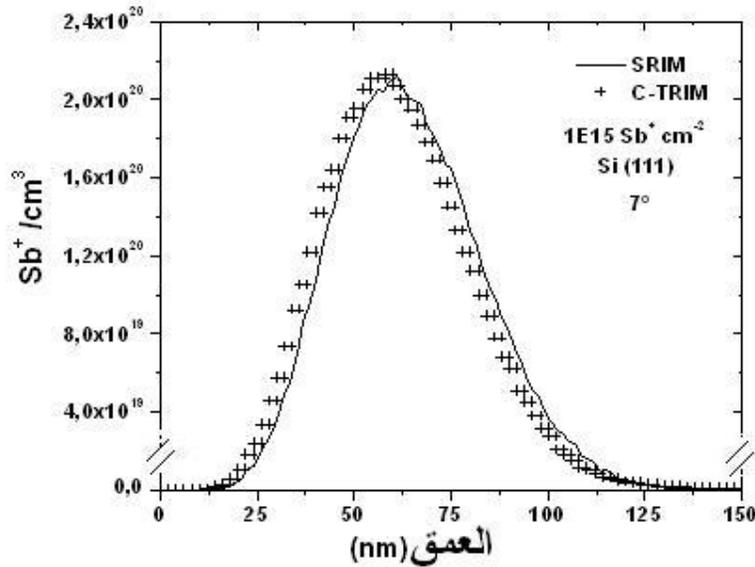
الشكل (71): رسم بياني يمثل نتائج المحاكاة (ببرنامج C-TRIM) الخاصة بمقارنة منحنى توزيع

أيونات As^+ ($100keV$ ، $1.5E16 As^+.cm^{-2}$) داخل الهدف Si بزواوية زرع 7° .

6-2-2 مقارنة توزيع الأيونات داخل الهدف بين SRIM و C-TRIM :

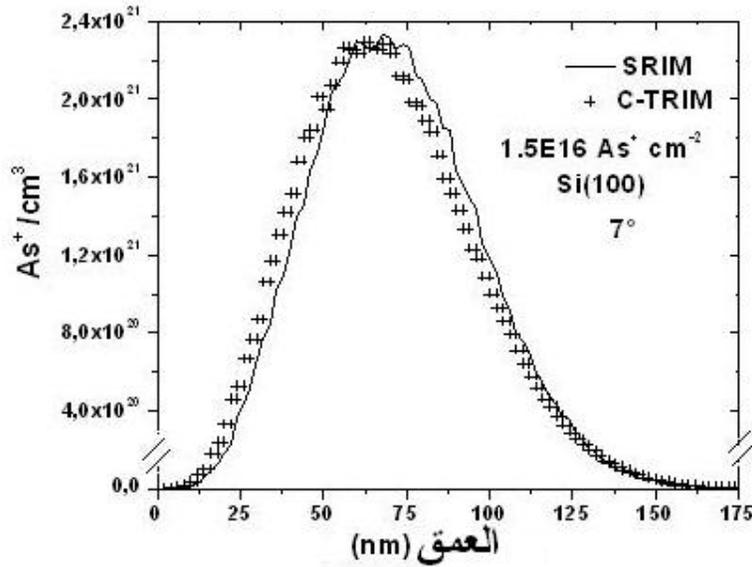
عند مطابقة منحنيات توزيع أيونات الأنتيموان و الزرنيخ داخل السليكون بالنسبة للبرنامجين في حالة توجيه العينة بـ 7 درجات، نلاحظ من خلال الشكلين (72) و (73) بأنه لا يوجد اختلاف. و هذا راجع لسببين أساسيين:

- البرنامج SRIM لا يأخذ بعين الاعتبار اتجاه الهدف، فهو يعتبر كل العينات غير مبلورة.
- البرنامج C-TRIM يأخذ بعين الاعتبار اتجاه الهدف. لكن عندما يكون هذا الأخير متوجا بـ 7° بالنسبة لحزمة الأيونات الواردة فإن هذه الحزمة ترى الهدف و كأنه غير مبلور.



الشكل (72): رسم بياني يمثل نتائج المحاكاة (ببرنامجي SRIM و C-TRIM) الخاصة بمقارنة

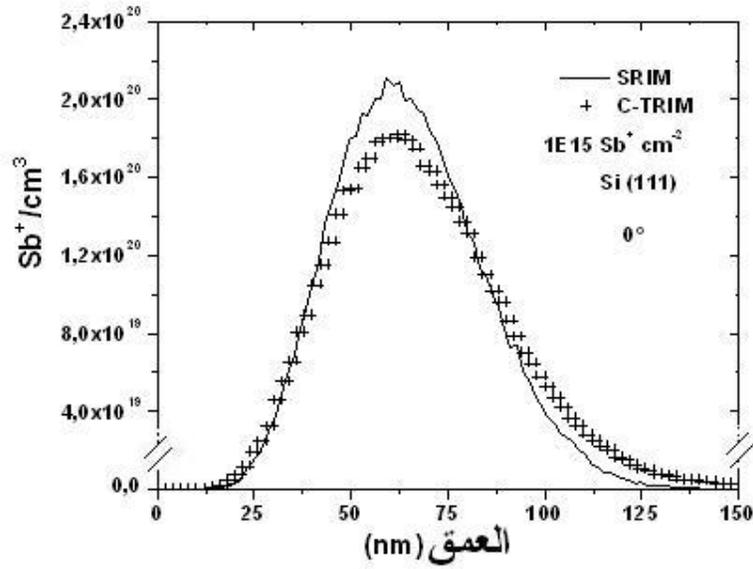
منحنى توزيع أيونات Sb^+ ($1E15 Sb^+.cm^{-2}$ ، $120keV$) داخل الهدف Si بزواية زرع 7° .



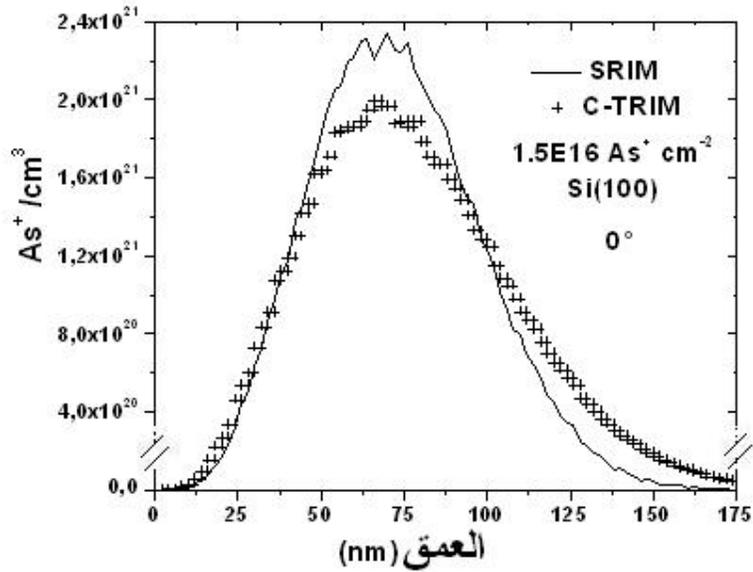
الشكل (73): رسم بياني يمثل نتائج المحاكاة (ببرنامجي SRIM و C-TRIM) الخاصة بمقارنة

منحنى توزيع أيونات As^+ ($1.5E16 As^+.cm^{-2}$ ، $100keV$) داخل الهدف Si بزواوية زرع 7° .

أما في حالة توجيه العينة بـ 0 درجة، نلاحظ من خلال الشكلين (74) و (75) بأنه يوجد اختلاف و ذلك بسبب أن برنامج C-TRIM يأخذ بعين الاعتبار توجيه سطح الهدف و هذا يظهر جليا في ذيل المنحنى الذي يتجه باتجاه العمق. بمعنى أن حزمة الأيونات إذا كانت عمودية بالنسبة لسطح الهدف المبلور، فإن هذه الأيونات تخترق العينة بحسب اتجاهها البلوري و بالتالي يؤخذ بعين الاعتبار من طرف البرنامج C-TRIM.



الشكل (74): رسم بياني يمثل نتائج المحاكاة (ببرنامجي SRIM و C-TRIM) الخاصة بمقارنة منحنى توزيع أيونات Sb^+ (120keV، $1E15 Sb^+.cm^{-2}$) داخل الهدف Si بزواوية زرع 0° .



الشكل (75): رسم بياني يمثل نتائج المحاكاة (ببرنامجي SRIM و C-TRIM) الخاصة بمقارنة منحنى توزيع أيونات As^+ (100keV، $1.5E16 As^+.cm^{-2}$) داخل الهدف Si بزواوية زرع 0° .

3- خاتمة جزئية:

في سياق هذا الفصل، تحصلنا على العديد من النتائج بواسطة المحاكاة و ذلك باستخدام برنامجي SRIM و برنامج C-TRIM اللذان يعتمدان على تقريب التصادمات الثنائية BCA. من خلال البرنامجين، توقعنا أهم الظواهر الخاصة باصطدام، فقدان و تحويل الطاقة لأيونات الانتمون أو الزرنينخ مع هدف من السليكون غير مبلور. تم أيضا الحصول على توزيع الايونات داخل الهدف و تقدير معاملات الزرع الأيوني مثل مسقط المسار المتوسط R_p ، الانحراف المعياري ΔR_p ،.... الخ. دراسة تكوين العيوب أخذت بعين الاعتبار بالنسبة للبرنامجين. بالإضافة إلى ذلك برنامج C-TRIM يدرس التفاعلات أيون-مادة في حالة الهدف المبلور و هذا ما ساعدنا على دراسة تأثير توجيه سطح العينة بالنسبة لحزمة الأيونات الواردة.

الفصل الرابع

الدراسة التجريبية للعينات المزروعة

1- مقدمة:

في سياق هذا الفصل سوف ندرس التفاعل الحقيقي الذي يحدث بين الأيونات الواردة (الأنتموان أو الزرنوخ) مع الهدف (السليكون). ثم بعد ذلك سوف نناقش و نحلل هذه النتائج و نقارنها مع النتائج التي تتبأنا بها عن طريق المحاكاة. أهم النتائج التي سوف نحصل عليها هي دراسة تأثير المعالجة الحرارية على إصلاح الأضرار الناتجة عن عملية الزرع و التفعيل الكهربائي للذرات المطعمة. سنقدر سمك الطبقة المتضررة و معاملات الزرع الأيوني مع إعطاء توزيع الأيونات و العيوب داخل المادة. هذه النتائج التجريبية سوف نحصل عليها بواسطة عدة تقنيات تجريبية و هي: مطيافية الانتشار الارتدادي لروذرفورد (RBS) في حالة الهندسة العشوائية و الموجهة، مطيافية انعراج الأشعة السينية (DRX)، مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR)، و في الأخير سوف ننتهي بتقنيتي مطيافية التآلق الضوئي (PL) دون أن ننسى تقنية الأربع نقاط لقياس المقاومة (quatre points).

2- تحضير العينات :

المجموعة الأولى و المجموعة الثانية من العينات المستعملة في التجربة تم تحضيرها عن طريق تقنية الزرع الأيوني. عينات المجموعة الأولى هي عبارة عن شرائح من السليكون أحادية التبلور ذات السطح الموجه <111> تم زرعها بأيونات الأنتموان Sb^{+} . هذا الإجراء كان في درجة حرارة الوسط و بطاقة تسريع تقدر بـ 120keV مع جرعات مختلفة (الجدول(8)). نذكر بأن العينات أثناء عملية الزرع و جهت بزواوية مقدارها 7° بغرض تجنب تغلغل الأيونات إلى مسافات كبيرة (تسمى بظاهرة الاستثناء). كذلك بعض العينات أخضعناها إلى معالجة حرارية، مقدارها $900^{\circ}C$ لمدة 30mn و ذلك تحت الفراغ العالي المقدر بـ $10^{-11}Torr$ ، بغرض إصلاح الأضرار الناشئة في العينة (الناجمة عن عملية الزرع) و تنشيط الأنتموان كهربائياً.

رمز العينة	الجرعة ($10^{15}\text{Sb}^+/\text{cm}^2$)	المعالجة الحرارية
V	ليست مطعمة	غير معالجة
S1	1	معالجة
S2	1	غير معالجة
S3	1.6	غير معالجة
S4	1.6	معالجة

الجدول(8): حوصلة للعينات المزروعة بالانتومان و المستعملة تجريبيا.

فيما يخص عينات المجموعة الثانية، فهي عبارة عن شرائح من السليكون أحادية التبلور ذات السطح الموجه <100> تم زرعها بأيونات الزرنيخ As^+ . هذه العملية تمت في درجة حرارة الوسط و بطاقة تسريع تقدر بـ 100keV مع جرعة محددة (الجدول(9)). نذكر بأن العينات أثناء عملية الزرع و جهت بزاوية مقدارها 7° بغرض تجنب استقناء الأيونات إلى مسافات أكبر. كذلك بعض العينات أخضعناها إلى معالجة حرارية (مقدارها 900°C لمدة 30mn في غرفة مفرغة إلى حد 10^{-6}Torr) و الغرض منها هو إصلاح الأضرار الناشئة في العينة من جراء عملية الزرع و تنشيط الزرنيخ كهربائيا.

رمز العينة	الجرعة ($10^{16}\text{As}^+/\text{cm}^2$)	المعالجة الحرارية
E1	ليست مطعمة	غير معالجة
E2	1.5	غير معالجة
E3	1.5	معالجة

الجدول(9): حوصلة للعينات المزروعة بالزرنيخ و المستعملة تجريبيا.

3- النتائج التجريبية :

3-1 تحليل العينات بتقنية RBS :

3-1-1 الشروط التجريبية المستعملة في تقنية RBS :

تحليل عينات المجموعة الأولى بواسطة تقنية RBS تم بطريقتين و هما الطريقة العشوائية و طريقة الاستثناء. بحيث في هذا التحليل تم استخدام جهاز مسرع من نوع فان دي غراف، ينتج جسيمات 4He^+ بطاقة مقدارها 2MeV . بالإضافة إلى ذلك سوف نجد بقية الشروط التجريبية المستعملة لتحليل العينات مذكورة في الجدول(10).

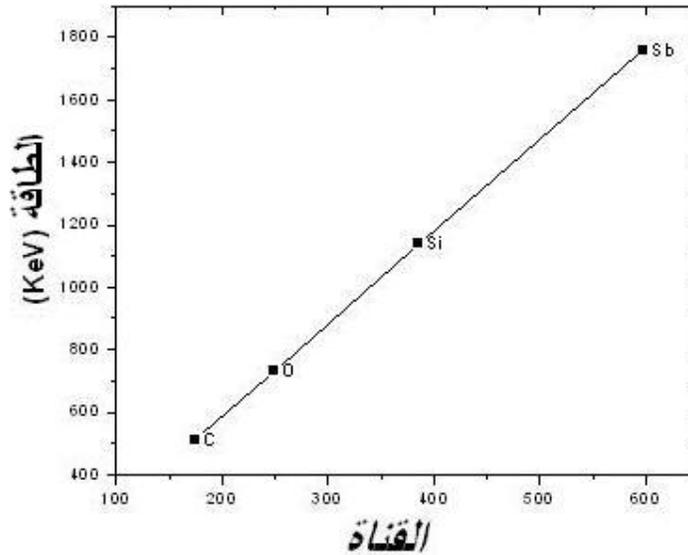
الزاوية الصلبة	معاملات المعايرة		التيار	زاوية الارتداد
	b (keV)	a (keV/canal)		
2.4msr	-1.311	2.945	100nA	165°

الجدول(10): حوصلة الشروط التجريبية المستعملة لتحليل العينات بتقنية RBS.

فيما يخص معاملات المعايرة a و b فإنها تتعلق بسلسلة الأجهزة المرتبطة بالكاشف. بحيث يكون دور هذه السلسلة هو تضخيم و تخزين المعلومات التي تحتويها الإشارة الناتجة من الكاشف في طيف RBS على شكل قنوات. لذلك، فإن معايرة هذه السلسلة هو مرتبط برقم القناة C و الذي يعبر عنه بواسطة دالة خطية من النوع $E=f(C)$ بحيث E هي طاقة الارتداد:

$$E(\text{KeV}) = a C + b \quad (59)$$

نستطيع تحديد قيم المعاملين a و b برسم مستقيم المعايرة $E=f(C)$ و ذلك باستعمال ثلاثة نقاط على الأقل. هذه النقاط يتم تحديدها من خلال رقم قناة ذروة السطح الخاصة بكل عنصر كيميائي و هذا ما يوضحه الشكل (76).



الشكل (76): رسم بياني يمثل منحنى المعايرة المرتبط بالكاشف.

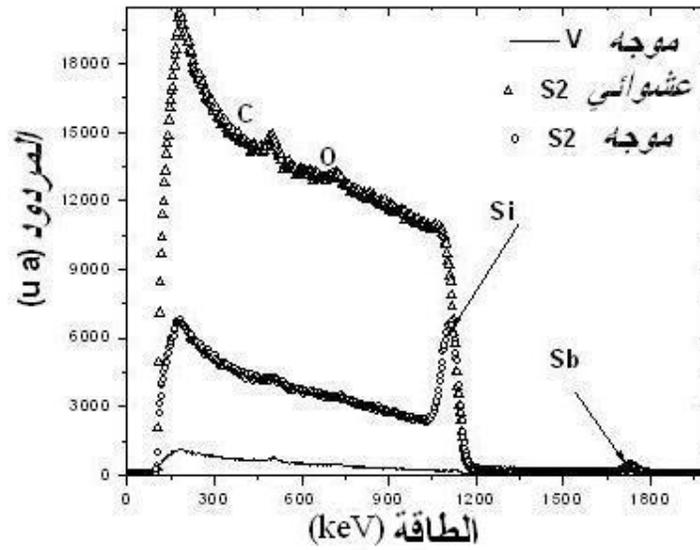
فيما يخص الشروط التجريبية الخاصة بهندسة الاستقناء، فإن حزمة الأيونات α أثناء تحليل العينات تكون موجهة بالتوازي مع المحور البلوري للينة $\langle 111 \rangle$. و أما بالنسبة للحصول على بئر الاستقناء، فإننا نعمل مسح زاوي للينة بجوار المحور البلوري للينة $\langle 111 \rangle$ و ذلك في مجال يقدر بـ $\pm 1^\circ$ بخطوة مقدارها 0.01° لكل قناة.

3-1-2 النتائج التجريبية الخاصة بتقنية RBS :

3-1-2-1 دراسة إشارة السليكون :

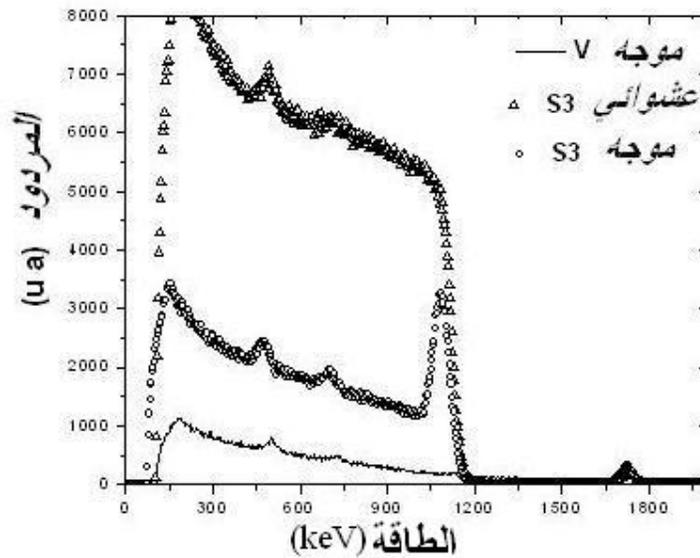
من أجل تقدير جيد لأثر التوجيه، قمنا بإضافة طيفين لطيف عينة من السليكون غير مزروعة ، بحيث الأول يمثل ورود الحزمة بطريقة عشوائية و الثاني يمثل ورود الحزمة بطريقة موجهة.

في الحالة الأولى، سوف ندرس حالة السليكون دون إخضاع العينة إلى معالجة حرارية. من خلال الشكلين (77) و (78) نلاحظ بأن هناك انخفاض في مردود الارتداد في المنطقة القريبة من السطح بين الطيف العشوائي و الطيف الموجه للعينة غير المزروعة. أما بالنسبة للطيف الموجه للعينة المزروعة، فنلاحظ ارتفاع في مردود الارتداد في المنطقة القريبة من السطح و الذي يظهر على شكل ذروة. هذا الارتفاع في المردود يدل على وجود طبقة متضررة في السليكون. و بذلك نستطيع القول بأن هذه الذروة ناتجة عن العيوب التي نشأت بالقرب من السطح من جراء عملية الزرع. و هذه النتائج قد قمنا بنشرها في المرجعين [113،114].



الشكل (77): رسم بياني يمثل أطياف RBS تجريبية بالطريقة العشوائية و طريقة الاستثناء لعينة (S2)

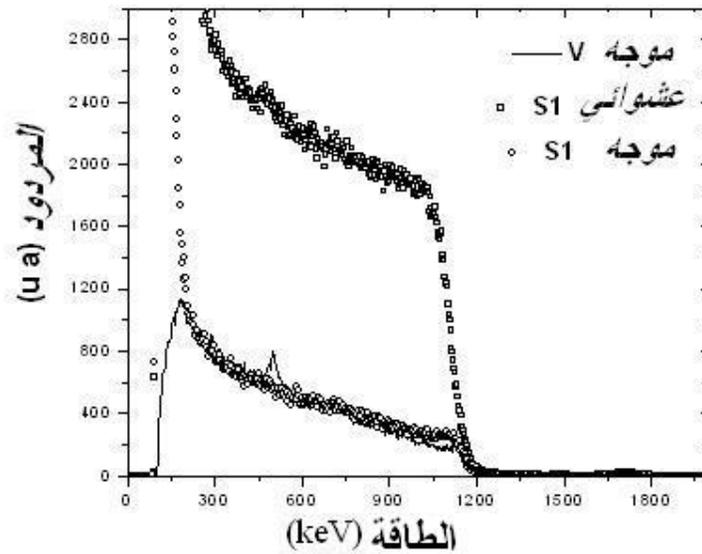
غير معالجة حراريا.



الشكل (78): رسم بياني يمثل أطياف RBS تجريبية بالطريقة العشوائية و طريقة الاستثناء لعينة (S3)

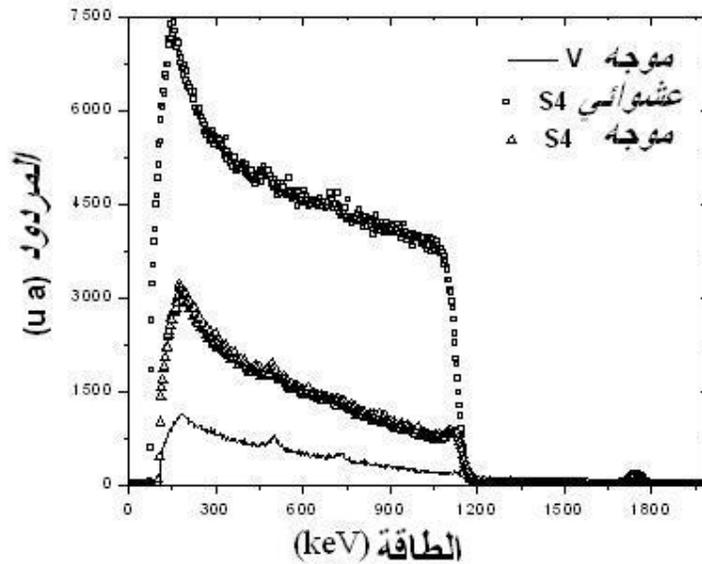
غير معالجة حراريا.

في الحالة الثانية، سوف ندرس حالة السليكون بعد إخضاع العينة إلى معالجة حرارية لمدة 30mn عند درجة الحرارة 900°C . نلاحظ في الشكلين (79) و (80) أثر المعالجة الحرارية على الطبقة المتضررة للسليكون من جراء عملية الزرع. من خلال هذين الطيفين، نلاحظ بأن هناك انخفاض في مردود الارتداد في المنطقة القريبة من السطح. أما في العمق فإن النسبة تتناقص بينهما بسبب عدم الاستثناء، بمعنى أن الزيادة التدريجية ترجع لعدد الأيونات المنحرفة بزواوية أكبر من الزاوية الحرجة. فيما يخص الذروة التي تمثل العيوب الناشئة في السطح، ينقص ارتفاعها بدلالة درجة حرارة المعالجة علما بأن هذه الظاهرة قد تم نشرها في المرجعين [114،113] أيضا. بحيث تتناقص الارتفاع مرده إلى تناقص تركيز العيوب، أما نقصانها في العمق فسببه انتقال السطح البيني غير مبلور/مبلور. لذلك فإن تطابق الطيف غير المزروع مع الطيف المزروع في حالة التوجيه يعطينا فكرة عن مدى إصلاح العيوب في العينة.



الشكل (79): رسم بياني يمثل أطياف RBS تجريبية بالطريقة العشوائية و طريقة الاستقناء لعينة (S1)

معالجة حراريا.



الشكل (80): رسم بياني يمثل أطياف RBS تجريبية بالطريقة العشوائية و طريقة الاستقناء لعينة (S4)

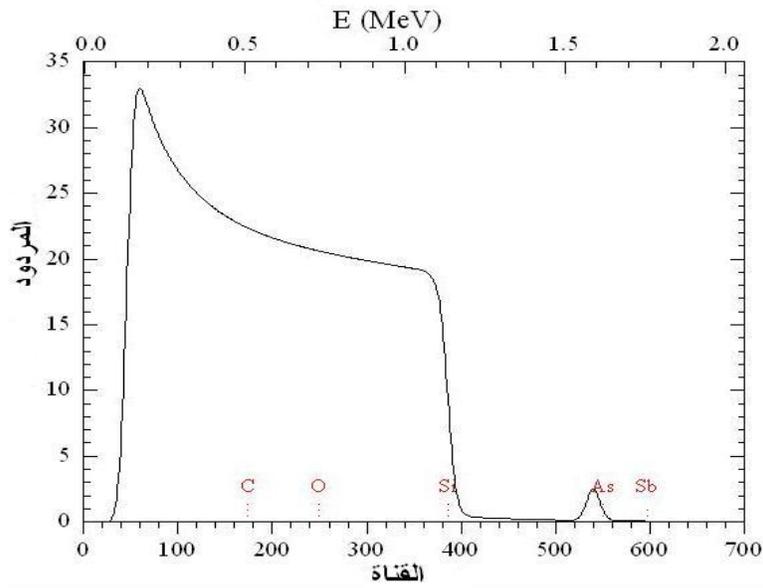
معالجة حراريا.

فيما يخص تحليل عينات المجموعة الثانية (عينات السليكون المزروعة بالزرنيخ)، فقد تنبأنا بطيف RBS باستعمال برامج المحاكاة RUMP و RBX، و ذلك في نفس الشروط التجريبية الخاصة بالمجموعة الأولى (عينات السليكون المزروعة بالأنتموان). الشكلان (81) و (82) يمثلان الطيف الافتراضي في الهندسة العشوائية و ذلك بواسطة البرامج RUMP و RBX على التوالي، لعينة من السليكون مزروعة بالزرنيخ. استطعنا من خلال هذان البرنامجان التنبأ بوضعية عنصر الزرنيخ مقارنة بعنصر الأنتموان و السليكون (الجدول(11)). حيث هذه الوضعية الافتراضية لطاقة الارتداد لكل عنصر منطقية و هي متناسبة مع معامل الحركة (الذي يتعلق بكتلة الذرة الناشرة) الذي ذكر في العبارة (26) و (27) من الفصل الثاني. بالإضافة إلى ذلك تنبأنا بالوضعية الافتراضية للعنصرين الأكسجين و الكربون اللذان قد يظهران في حالة تلوث سطح العينة.

العنصر	الكتلة M(g/mol)	معامل الحركة K	طاقة الارتداد E1(keV)
Sb	121.750	0.8787	1.757×10^3
As	74.922	0.8104	1.621×10^3
Si	28.086	0.5688	1.138×10^3
O	15.999	0.3659	731.8
C	12.011	0.2559	511.7

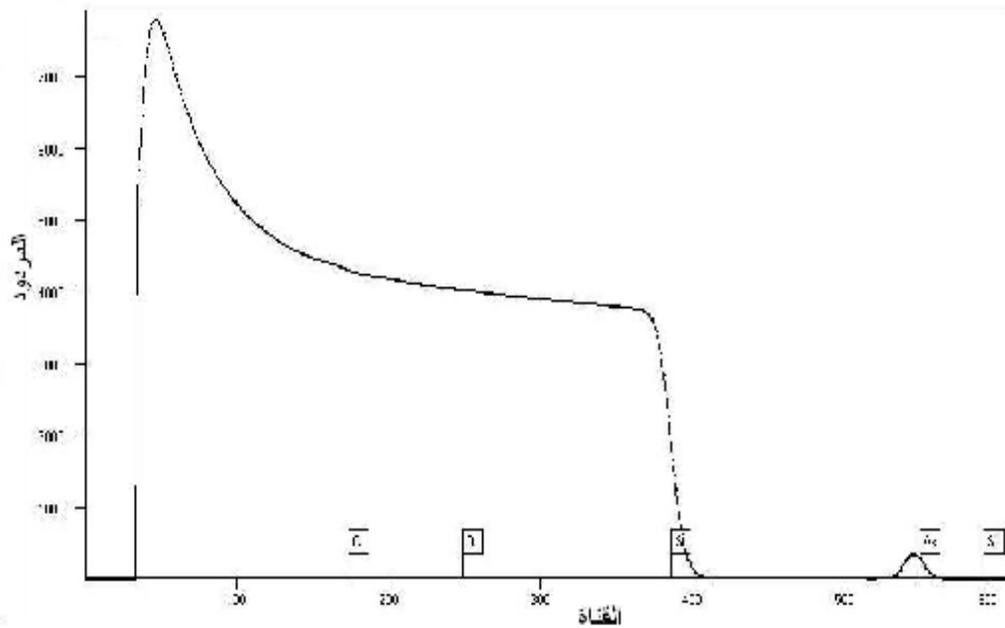
الجدول (11): ملخص لمعامل الحركة و طاقة الارتداد محصل عليه بواسطة برنامج RUMP،

الخاص بكل عنصر موجود في العينة المدروسة.



الشكل (81): طيف محاكاة افتراضي في الهندسة العشوائية لعينة من السيلكون مزروعة بالزرنيخ

بواسطة برنامج RUMP.

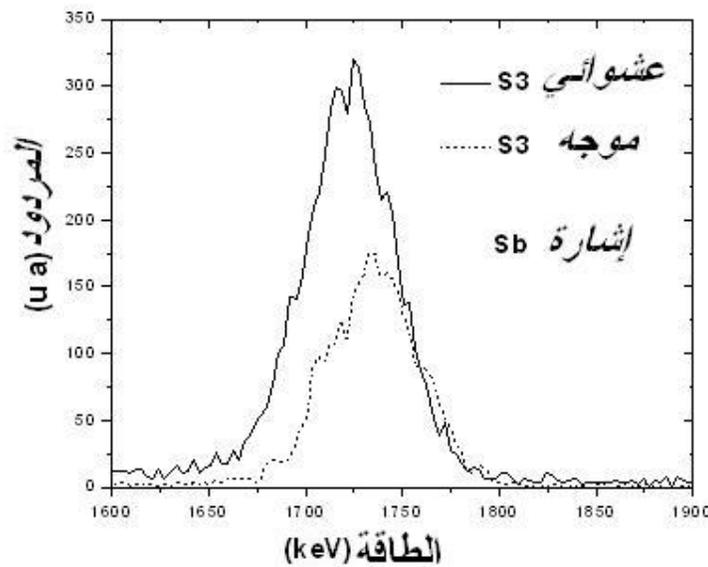


الشكل (82): طيف محاكاة افتراضي في الهندسة العشوائية لعينة من السيلكون مزروعة بالزرنيخ

بواسطة برنامج RBX.

3-1-2-2 دراسة إشارة الأنتمون :

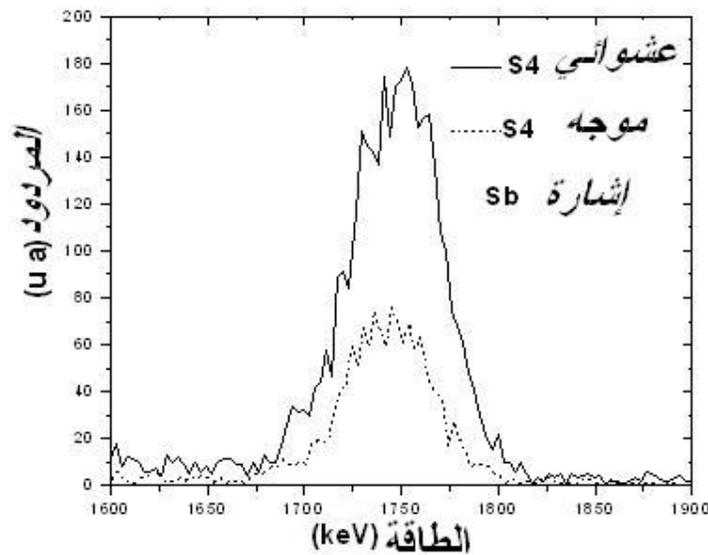
نلاحظ من خلال الشكل (83) بأن الطيفين الموجه و العشوائي لأيونات الأنتمون الخاص بالعينه التي لم تعالج حراريا غير متطابقين و هذا يدل على أنه توجد كمية من أيونات الأنتمون ليست في المواقع الانغراسية بدل المواقع الاحلالية للسليكون. و هذه الظاهرة قد سبق لنا نشرها في المرجع [114] و هي ما توافق نتائج المرجع [115]. بعبارة أخرى، لو كان هناك تطابق بين الطيفين لقلنا بأن أغلبية الأيونات متواجدة في مواقع انغراسية. كما نلفت النظر بأن نفس النتائج تحصلنا عليها بالنسبة للجرعة $1E15Sb^+cm^{-2}$.



الشكل(83): رسم بياني يمثل أطياف RBS (إشارة الأنتمون فقط) تجريبية بالطريقة العشوائية و طريقة الاستثناء لعينة (S3) ليست معالجة حراريا.

نلاحظ من خلال الشكل (84) الخاص بالطيفين الموجه و العشوائي لأيونات الأنتمون، في العينه التي تمت معالجتها حراريا، تناقص مهم لارتفاع الطيفين مقارنة بالشكل السابق. هذا التناقص يفسر بانتقال أيونات الأنتمون من المواقع الانغراسية باتجاه المواقع الاحلالية بحيث تكون نشطة كهربائيا. هذه

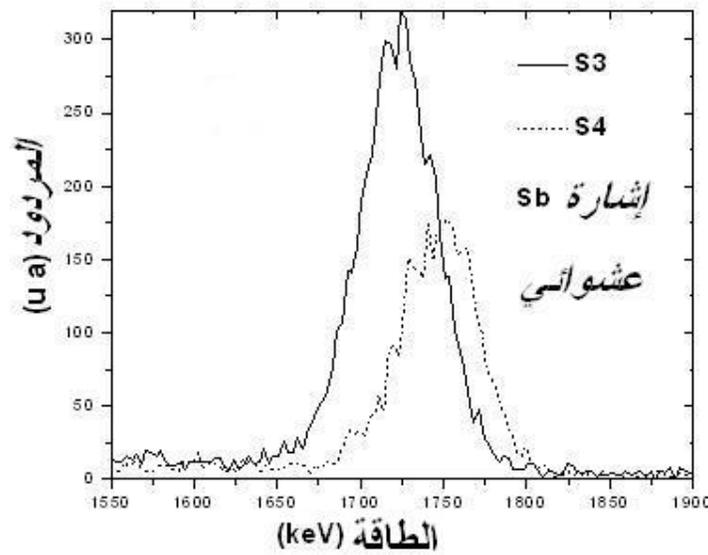
الظاهرة قد سبق لنا نشرها في المرجع [114] أيضا و هي توافق نتائج المرجع [115]. نلاحظ أيضا من خلال الطيف الموجه بأن درجة الحرارة المستعملة أعطت لنا نظرة بأن نسبة الهجرة لأيونات الأنتيموان باتجاه المواقع الاحلالية كانت أعظمية. فيما يخص الجرعة $1E15Sb^+cm^{-2}$ فإن نفس الظواهر قد تحصلنا عليها.



الشكل (84): رسم بياني يمثل أطياف RBS (إشارة الأنتيموان فقط) تجريبية بالطريقة العشوائية و

طريقة الاستقناء لعينة (S4) معالجة حراريا.

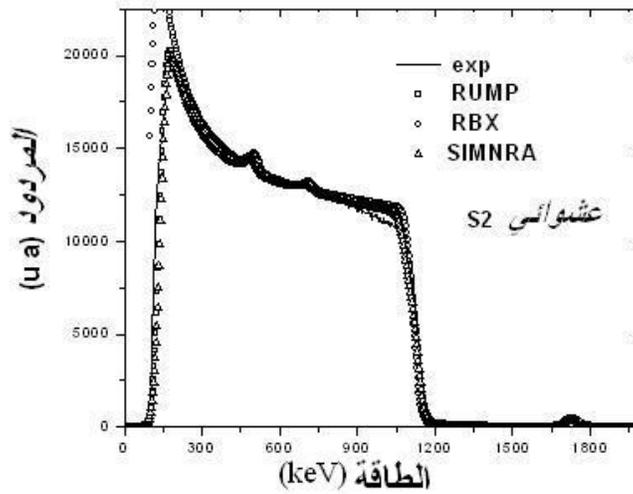
من خلال الشكل (85)، نلاحظ بأن مساحة المنحنى الخاص بالعينة (S3) غير المعالجة حراريا أكبر بكثير منه في حالة المنحنى الخاص بالعينة (S4) المعالجة حراريا. نستطيع تفسير هذا الاختلاف بأنه راجع إلى فقدان كبير للأنتيموان الناتج عن الانتشار الخارجي (exo-diffusion) من مسند السليكون بعد معالجة العينة حراريا. هذه الظاهرة ذكرناها في المرجع [113] و هي متوافقة مع دراسات أجريت في السابق [116،117]. كما نلفت النظر بأنها لوحظت أيضا بالنسبة للجرعة $1E15Sb^+cm^{-2}$.



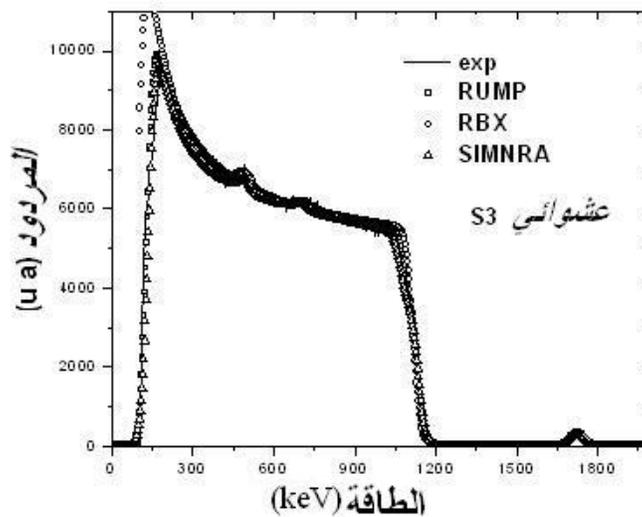
الشكل (85): رسم بياني يمثل أطياف RBS (إشارة الأنتومان فقط) تجريبية بالطريقة العشوائية للعينات (S4) معالجة حراريا و (S3) غير معالجة حراريا.

3-2-1-3 تقدير معاملات زرع أيون Sb^+ في Si (111):

للحصول على منحنى توزيع و تركيز الأيونات المزروعة داخل العينة من خلال أطياف RBS التجريبية في الهندسة العشوائية، استعملنا عدة برامج و التي قمنا بذكر لمحة عنها في الفصل (2). نلاحظ من خلال الشكلين (86) و (87) بأن الأطياف النظرية المحصل عليها باستخدام هذه البرامج هي في تطابق تام مع بعضها البعض، زيادة على ذلك فهي تتوافق أيضا مع الطيفين التجريبيين الخاصين بالعينتين S2 و S3 المحصل عليهما في الهندسة العشوائية.

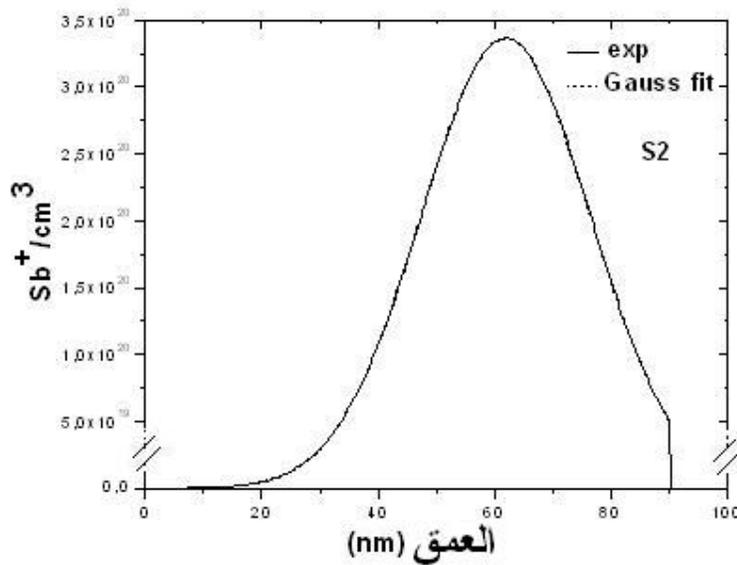


الشكل (86): رسم بياني يمثل الطيف RBS (بالطريقة العشوائية) التجريبي للعيينة (S2) غير معالجة حرارياً (—) و أطياف محصل عليها بالمحاكاة عن طريق البرامج RUMP (□)، RBX (○) و SIMNRA (△).

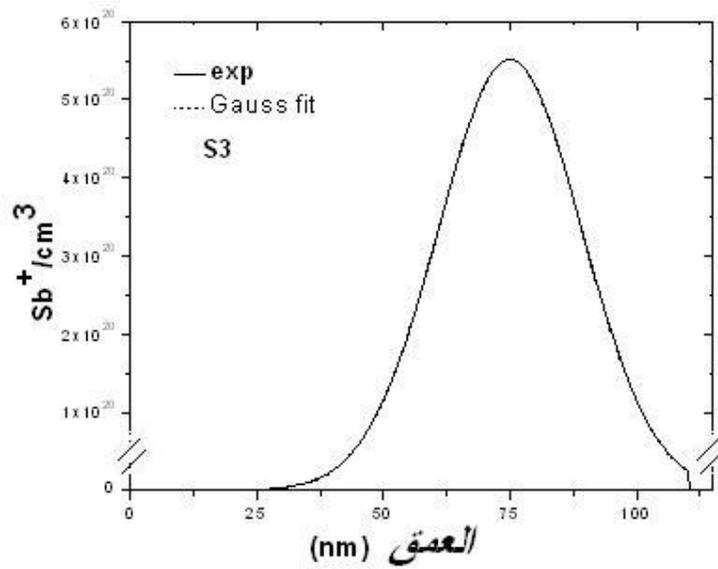


الشكل (87): رسم بياني يمثل الطيف RBS (بالطريقة العشوائية) التجريبي للعيينة (S3) غير معالجة حرارياً (—) و أطياف محصل عليها بالمحاكاة عن طريق البرامج RUMP (□)، RBX (○) و SIMNRA (△).

بعد أن قمنا بمحاكاة الأطياف التجريبية، استطعنا الحصول على منحنيات توزيع ذرات الأنتيموان داخل السليكون. الشكلين (88) و (89) محصل عليهما بواسطة البرنامج RUMP. أما الشكل (90) فقد تم الحصول عليه عن طريق البرنامج RBX و هو متطابق مع دراسة أنجزت سابقا [118]. من خلال هذه المنحنيات، يمكننا استيعاب توزيع الأنتيموان بواسطة قانون غوسي متركز بأقصى تركيز على عمق R_p [110,37,36]. و هو يمثل العمق الذي يكون فيه تركيز ذرات الأنتيموان أعظمي. بالإضافة إلى مقدار R_p ، فقد وفر لنا هذان البرنامجان معلومات أخرى قيمة مثل ΔR_p و التركيز. كل هذه المقادير محصل عليها بتقدير جيد و هي ملخصة في الجدولين (12) و (13) بالنسبة للبرنامجين RUMP و RBX على التوالي.



الشكل (88): رسم بياني يمثل توزيع ذرات الأنتيموان، داخل الهدف (Si) بالنسبة للعيينة S2، بواسطة البرنامج RUMP. المنحنى التجريبي (—) و المنحنى النظري بتطبيق قانون غوسي (...).

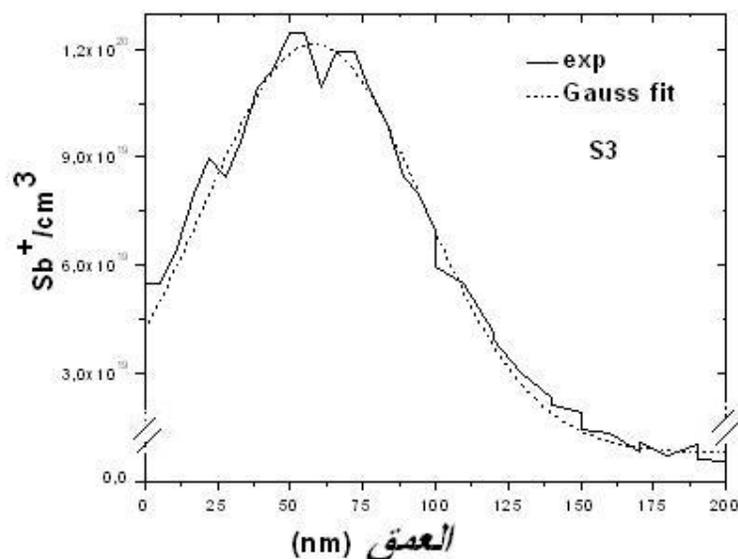


الشكل (89): رسم بياني يمثل توزيع ذرات الأنتيموان، داخل الهدف (Si) بالنسبة للعيينة S3، بواسطة البرنامج RUMP. المنحنى التجريبي (—) و المنحنى النظري بتطبيق قانون غوسي (....).

معاملات الزرع لـ Sb			رمز العينة
التركيز Sb ⁺ /cm ³	ΔRp (Å)	Rp (Å)	
3.36E20	170	620	S2
5.50E20	165	750	S3

الجدول (12): ملخص لمختلف القيم الخاصة بمعاملات الزرع لذرات الأنتيموان داخل Si بواسطة

برنامج RUMP.



الشكل (90): رسم بياني يمثل توزيع ذرات الأنتيموان، داخل الهدف (Si) بالنسبة للعيينة S3، بواسطة البرنامج RBX. المنحنى التجريبي (—) و المنحنى النظري بتطبيق قانون غوسي (...).

معاملات الزرع لـ Sb			العيينة
التركيز Sb ⁺ /cm ³	ΔRp (Å)	Rp (Å)	
7.59E19	223	613	S2
1.24E20	191	593	S3

الجدول (13): ملخص لمختلف القيم الخاصة بمعاملات الزرع لذرات الأنتيموان داخل Si بواسطة

برنامج RBX.

نلاحظ من خلال الجدولين (12) و(13)، بأن تركيز الأنتيموان المتحصل عليه قد تجاوز الحد الأقصى لذوبان الأنتيموان في السليكون، و الذي يقدر بـ $7 \times 10^{19} \text{Sb}^+/\text{cm}^3$ حسب عدة مراجع [120,119,42,34]، و هو يوافق أحد مزايا عملية الزرع الأيوني. نلاحظ أيضا بأن الجرعة

المتحصل عليها قد تجاوزت الجرعة التي تشكل الطبقة البلورية في العينة و التي تقدر $1E14 \text{ cm}^{-2}$ بالنسبة للأنتيموان في السليكون [42،26].

زيادة على هذا، فإننا استطعنا تحديد التركيب الكيميائي للعينات و ما تحتويه من عناصر مزروعة في العينة أو على شكل شوائب على سطح العينة، بحيث يظهر جليا وجود شوائب و هي الكربون و الأكسجين (الشكل(77)). استعملنا برنامج SIMNRA في تقدير كمية الشوائب (الجدول (14)) و الخاصة بالطبقة الأولى المفترضة ابتداء من السطح.

من خلال الجدول (14) نلاحظ بأن كمية الأنتيموان تناقصت في العينات المعالجة حراريا و هذا ما بيناه في الشكل (85). و فسرنا هذا الاختلاف بأنه راجع إلى فقدان كمية من الأنتيموان ناتجة عن الانتشار الخارجي (exo-diffusion) من مسند السليكون بعد معالجة العينة حراريا. هذه الظاهرة ذكرناها في المرجع [113] و هي متوافقة مع دراسات أجريت في السابق [117،116].

أما فيما يخص الشوائب (الكربون و الأكسجين) فهي متواجدة بكمية معتبرة و هذا ربما راجع إلى تلوث العينات أثناء تحليلها بواسطة تقنية RBS [121].

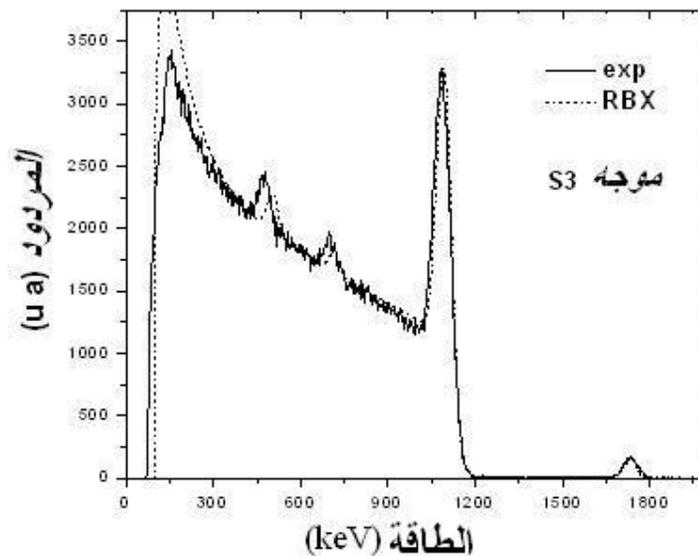
الطبقة 2	الطبقة 1				رمز العينة
	Si %at	O %at	C %at	Sb %at		Si %at
100	20	30	--	50	V
100	10	40	0,29	49,71	S2
100	9	30	0,099	60,901	S1
100	20	59	0,63	20,37	S3
100	10	35	0,42	54,58	S4

الجدول(14): ملخص التركيب الكيميائي للعناصر المزروعة و الشوائب في العينات المدروسة، و

المحصل عليها بواسطة برنامج SIMNRA.

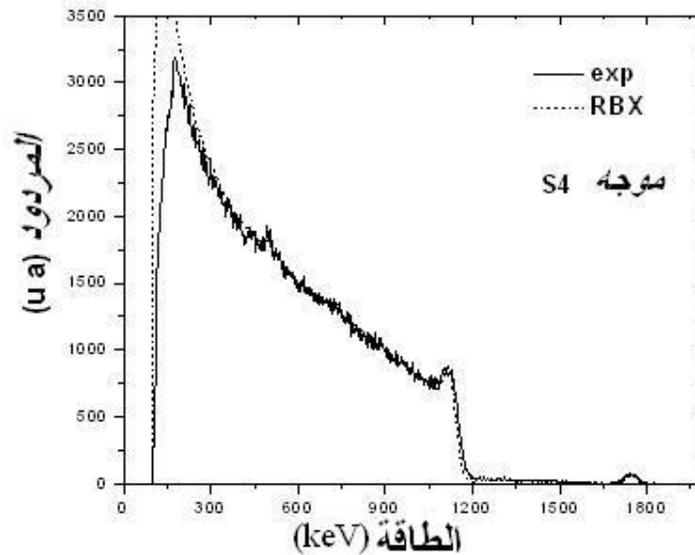
3-1-2-4 دراسة توزيع العيوب داخل العينة:

للحصول على منحنى توزيع و تركيز العيوب داخل العينة من خلال أطياف RBS التجريبية في هندسة الاستقناء، استعملنا برنامج RBX و الذي قمنا بذكر لمحة عنه في الفصل (2). نلاحظ من خلال الشكلين (91) و (92) بأن الأطياف النظرية المقترحة من قبل هذا البرنامج هي في تطابق تام مع الطيف التجريبي الموجه. من جهة أخرى، تحصلنا على سمك الطبقة المتضررة و الذي قدر بـ 204nm بالنسبة للعينة التي لم يتم معالجتها حراريا و هي S3. أما بالنسبة للعينة المزروعة بالجرعة $1E15Sb+cm-2$ ، فقد تحصلنا على نتائج مشابهة. إذ قدر سمك الطبقة المتضررة بـ 122nm.



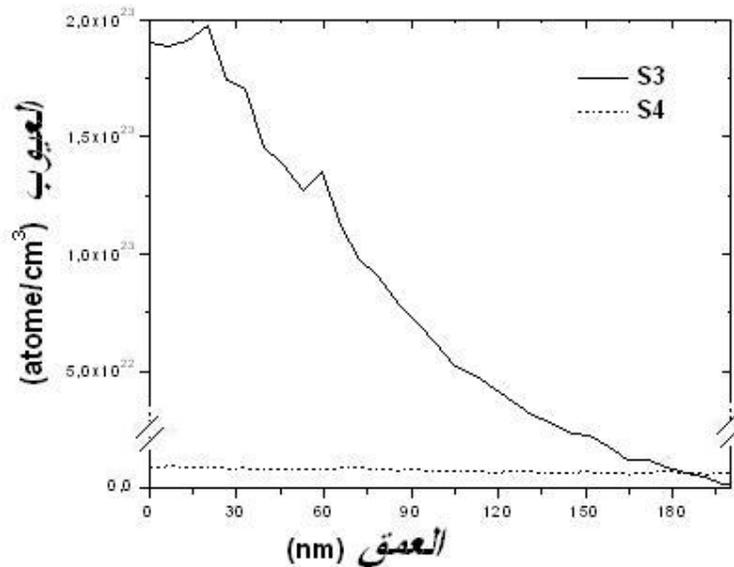
الشكل (91): رسم بياني يوضح الطيف RBS التجريبي بطريقة الاستقناء للعينة (S3) غير المعالجة

حراريا (—) و الطيف المحصل عليه بالمحاكاة بواسطة البرنامج RBX (---) .



الشكل(92): رسم بياني يوضح الطيف RBS التجريبي بطريقة الاستقناء للعيينة (S4) المعالجة حراريا (—) و الطيف المحصل عليه بالمحاكاة بواسطة البرنامج RBX (---) .

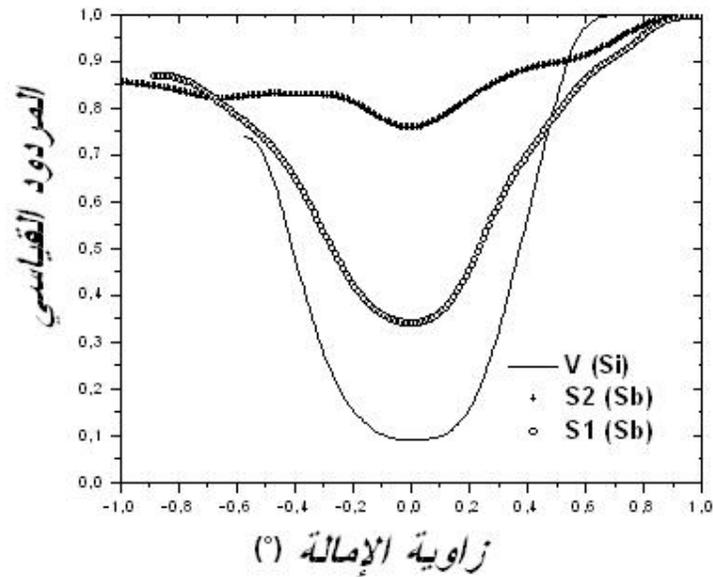
بعد عملية محاكاة الأطياف الموجهة، تحصلنا على منحنيات توزيع العيوب داخل الهدف المتمثلة في الشكل (93). نلاحظ بأن تركيز العيوب في العينة المزروعة دون معالجتها حراريا يكون بنسبة عالية. بحيث في حالة العينة S2 (غير موضحة في الشكل) تركيز العيوب يقدر بـ $5.93E22at/cm^3$ أما بالنسبة للعيينة S3 فهو يقدر بـ $1.91E23at/cm^3$. و هذا يترجم وجود ضرر كبير في العينة و هو يوافق المراجع [45،44]. بعد إخضاع العينات إلى المعالجة الحرارية، نلاحظ بأن تركيز العيوب انخفض بشكل كبير. بحيث في حالة العينة S1 (غير موضحة الشكل) تركيز العيوب يقدر بـ $4.53E21at/cm^3$ أما بالنسبة للعيينة S4 فهو يقدر بـ $8.56E21at/cm^3$ و هذا يترجم إصلاح الضرر الكبير الذي كان في العينة من جراء عملية الزرع و هو ما يوافق نتائج المرجع [42].



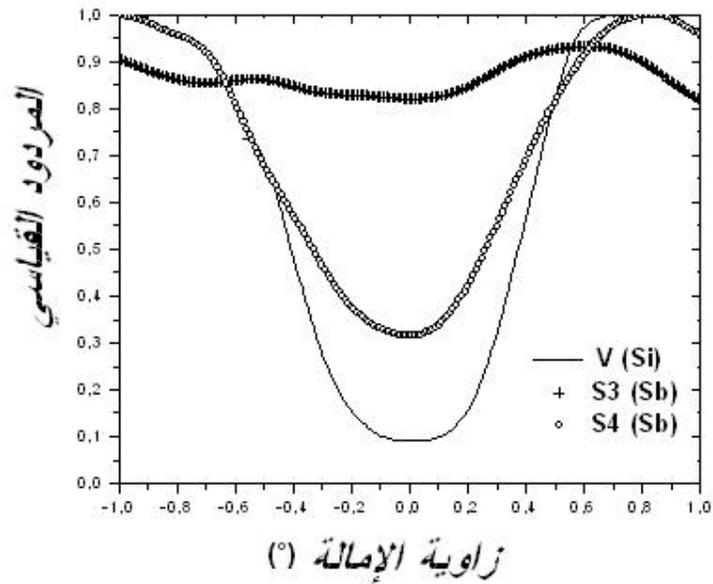
الشكل (93): رسم بياني يوضح منحنيات توزيع العيوب داخل الهدف Si بالنسبة للعينات المعالجة (S3) و غير المعالجة (S4) حراريا.

3-1-2-5 دراسة بئر الاستثناء :

لدراسة إعادة توزيع ذرات الأنتموان في المسند Si(111)، استعملنا بئر الاستثناء المتحصل عليه بواسطة تقنية RBS في هندسة الاستثناء وفقا للمحور الرئيسي $\langle 111 \rangle$ (الشكل (94) و (95)). بالنسبة للعينات المزروعة و غير معالجة حراريا (S2, S3) كان التوزيع الزاوي بالتقريب خطي مما يعني بأن ذرات الانتموان كانت متموضعة عشوائيا في الهدف. بعد المعالجة الحرارية ، شكل البئر أصبح أكثر عمقا وضيقا و هو راجع إلى هجرة ذرات الانتموان إلى المواضع الإحلالية في السليكون. هذه النتائج قمنا بنشرها في المرجع [113] و هي ما توافق نتائج المرجع [122].



الشكل (94): رسم بياني يمثل تطور بئر الاستقناء للانتموان بالنسبة للعينات: المعالجة حراريا (S1)، غير المعالجة حراريا (S2) و المرجع (V).



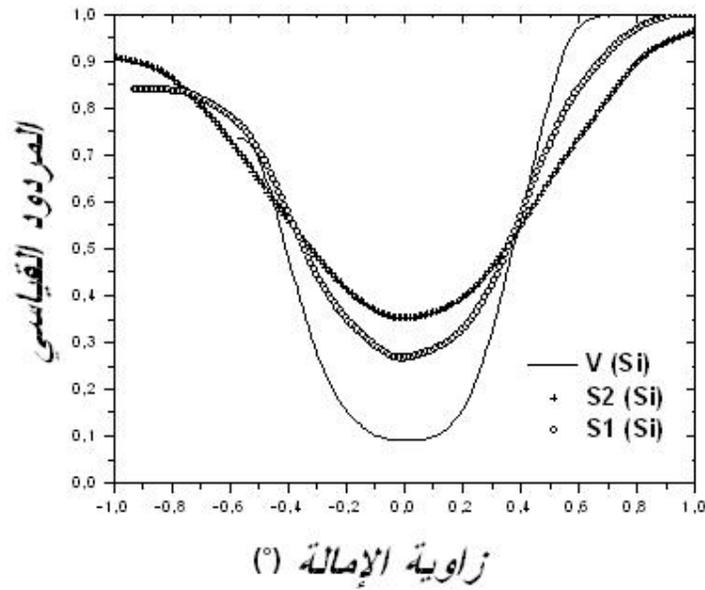
الشكل (95): رسم بياني يمثل تطور بئر الاستقناء للانتموان بالنسبة للعينات: المعالجة حراريا (S4)، غير المعالجة حراريا (S3) و المرجع (V).

بعد حساب قيمة نسبة الذرات الموجودة في المواقع الاحلالية F_s ، من خلال بئر الاستقناء الخاص بالانتومان و الموضحة في الجدول (15)، نلاحظ بأن هذه النسبة بعد المعالجة الحرارية ازدادت. هذا راجع إلى انتقال ذرات الانتومان من المواقع الانغراسية إلى المواقع الاحلالية. و بالتالي سوف ينعكس ايجابيا على ناقلية العينة نصف الناقلية.

رمز العينة	F_s	C_{min}
S1	0.7266	0.341
S2	0.2646	0.760
S3	0.1323	0.880
S4	0.7409	0.328

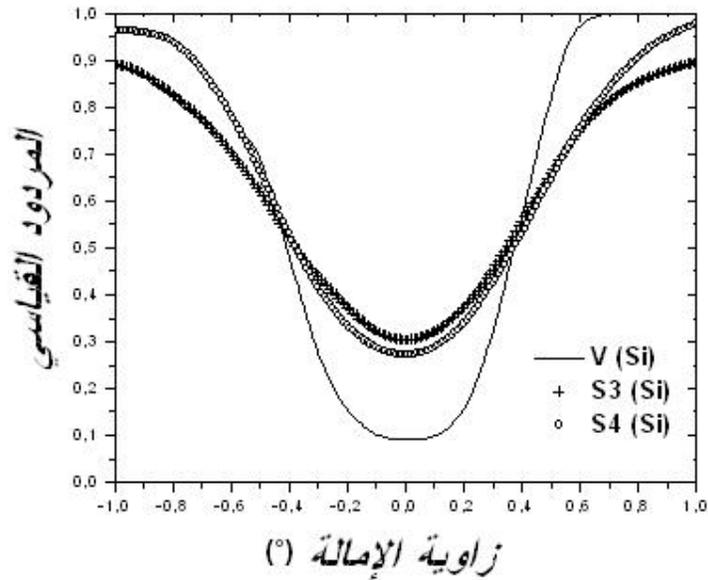
الجدول (15): ملخص قيم نسبة الذرات التي تحتل الموقع الاحلالية.

نلاحظ من خلال بئر الاستقناء الخاص بالسليكون غير المطعم، في الشكلين (96) و (97)، بأنه دائما الأكثر عمقا و اتساعا من البئر الخاص بالسليكون المطعم بحالتيه المعالج أو غير المعالج حراريا. نسجل أيضا بان البئر المحصل عليه من خلال العينة غير المعالجة حراريا هو أقل عمقا و هذا ما يعكس نسبة الضرر الناشئ أثناء الزرع.



الشكل (96): رسم بياني يمثل تطور بئر الاستقناء للسليكون بالنسبة للعينات: المرجع (V)، المعالجة

حراريا (S1) و غير المعالجة حراريا (S2).



الشكل (97): رسم بياني يمثل تطور بئر الاستقناء للسليكون بالنسبة للعينات: المرجع (V)، المعالجة

حراريا (S4) و غير المعالجة حراريا (S3).

2-3 تحليل العينات بتقنية DRX :

1-2-3 الشروط التجريبية المستعملة في تقنية DRX :

في هذا العمل، استخدمنا جهاز DRX ذو النوع Simens D8. يحتوي على مهبط من النحاس و مرشح من النيكل لتمرير الخط المميز K_{α} فقط الموافق لطول الموجة $\lambda_{K\alpha}=1.542\text{\AA}$. فيما يخص جهد التسريع و التيار في السلك، فقد ثبتا في 35KV و 20mA على التوالي. تم تنفيذ المسح بخطوة مقدارها 0.02° في مجال $[10^{\circ}-100^{\circ}]$ ، بحيث قدر الزمن الكلي للتحليل بساعة واحدة لكل عينة.

2-2-3 النتائج التجريبية الخاصة بتقنية DRX :

فما يخص المجموعة الأولى (العينات المزروعة بالأنتموان)، فإننا حصلنا على النتائج التالية. من خلال الشكلين (98) و (99)، نلاحظ بأن طيف العينة المرجع (V) يتكون من ذروتين أساسيتين، الأولى في $2\theta=28.58^{\circ}$ و الثانية في $2\theta=95.08^{\circ}$ و هي موافقة للخطين المميزين Si(111) و Si(333) على التوالي. شدة هذين الذروتين أعظمية و هي تدل على النوعية البلورية الجيدة للعينة المرجع.

بالنسبة للعينة (S3) المزروعة و دون معالجة حرارية، نلاحظ بأن شدة الخط Si(111) انخفضت بشكل ملحوظ و الخط Si(333) قد اختفى تماما. بالإضافة إلى ذلك، لاحظنا وجود انزياح للخط المميز Si(111) مقارنة بالعينة غير المزروعة (أي المرجع) (الشكل 98-ب)). حيث قدرنا هذا الفارق بـ $\Delta\theta=0.09^{\circ}$ الذي يوافق إجهاد داخلي $\varepsilon=0.62\%$ و هي من نفس الرتبة مع نتائج محصل عليها في المرجع [123]. و هذا يدل على وجود اضطراب كبير في شبكة السليكون بعد عملية الزرع و قد قمنا بنشر هذا في المرجع [124] و هو ما يوافق نتائج المراجع [125،126]. من خلال الشكل (99)

بالنسبة للعينات (S2,S1) نسجل أيضا، أنه كلما زادت الجرعة، زادت الاضطرابات في الشبكة. هذه

الظاهرة مترجمة بالنقص في شدة الخط المميز في طيف DRX و هي موافقة للمرجع [127].

بعد إجراء المعالجة الحرارية للعينات المزروعة، نلاحظ بأن شدة الخط المميز Si(111) ازدادت

مقارنة بالخط المميز الموافق للعينات التي لم يتم معالجتها حراريا. بالإضافة إلى ذلك، نسجل إعادة

ظهور الخط Si(333) الذي اختفى من الطيف (الشكل(98)). هذه الزيادة دليل واضح على أن الشبكة

البلورية تم إصلاحها و هو يوافق ما نشرناه في المرجع [124]. كما نسجل أن النتائج المحصل عليها

في توافق تام مع ما كشف عنه بواسطة تقنية RBS في هندسة الاستثناء.

نسجل أيضا مقارنة بالعينة المرجع، أنه ما يزال هناك انزياح صغير للخط المميز Si(111). حيث

قدرنا هذا الفارق بـ $\Delta\theta=0.01^\circ$. هذا يجعلنا نستنتج بأن هنالك إجهاد داخلي باق في الشبكة البلورية

و هو صغير مقارنة بالعينة غير المعالجة. حيث تقدر قيمته بـ $\varepsilon=0.07\%$ ، و هو راجع لتموضع

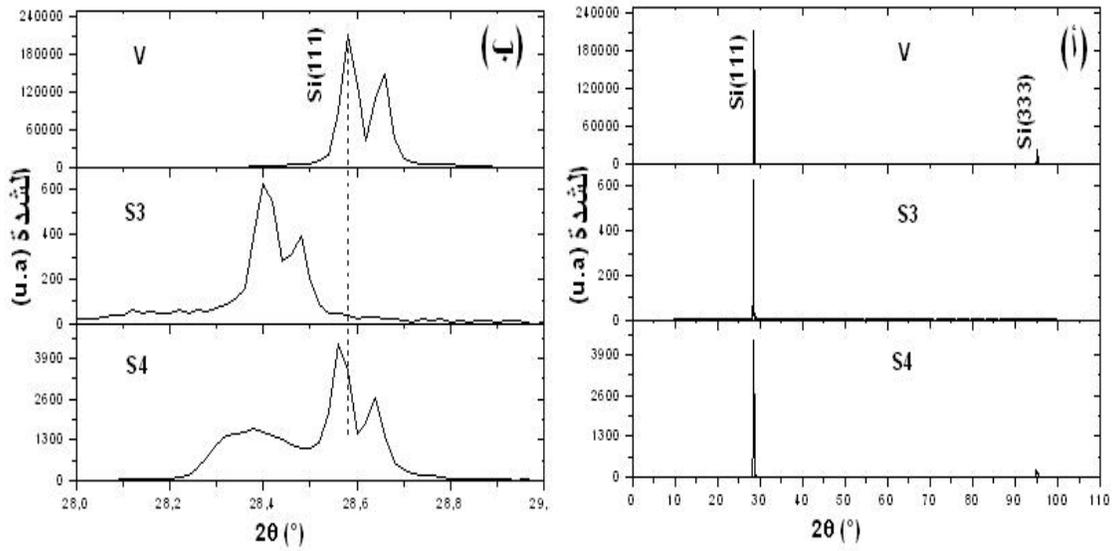
ذرات الأنتيمون في المواقع الاحلالية وتأثير حجمها (نصف قطرها أكبر مقارنة بنصف قطر ذرة

السليكون) على زيادة معامل الشبكة (تمدد الشبكة) [127،95]. فيما يخص العينات المزروعة بالجرعة

$1E15Sb^+cm^{-2}$ ، سجلنا نفس الظواهر مقارنة بالعينات المزروعة بالجرعة الأكبر (أي

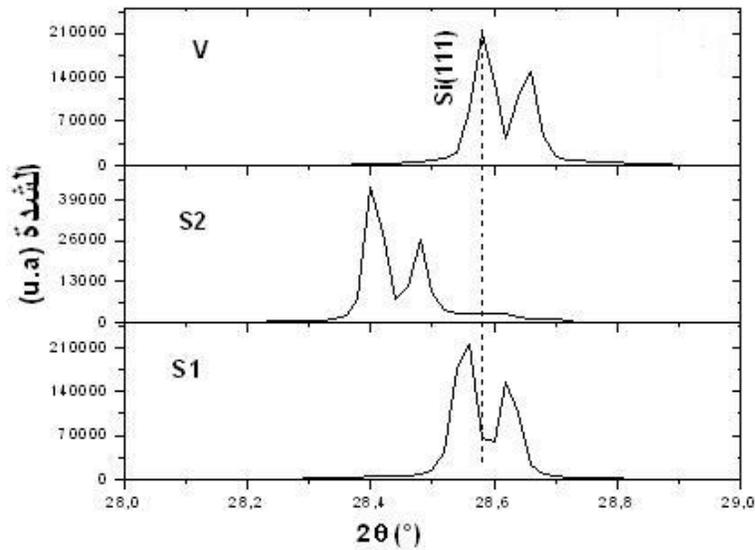
$1.6E15Sb^+cm^{-2}$) (أنظر الشكل (99)). كما أن الاضطرابات في الشبكة، كانت أقل من تلك التي

حصلنا عليها بالنسبة للجرعة الأكبر و هي موافقة للمرجع [127].



الشكل (98): (أ) أطيف الأشعة السينية الخاصة بالعينات V (المرجع)، S3 و S4 (المزروعة

بالأنتموان)، (ب) تكبير الأطيف (أ) في المجال $2\theta (^\circ) = [28,29]$.



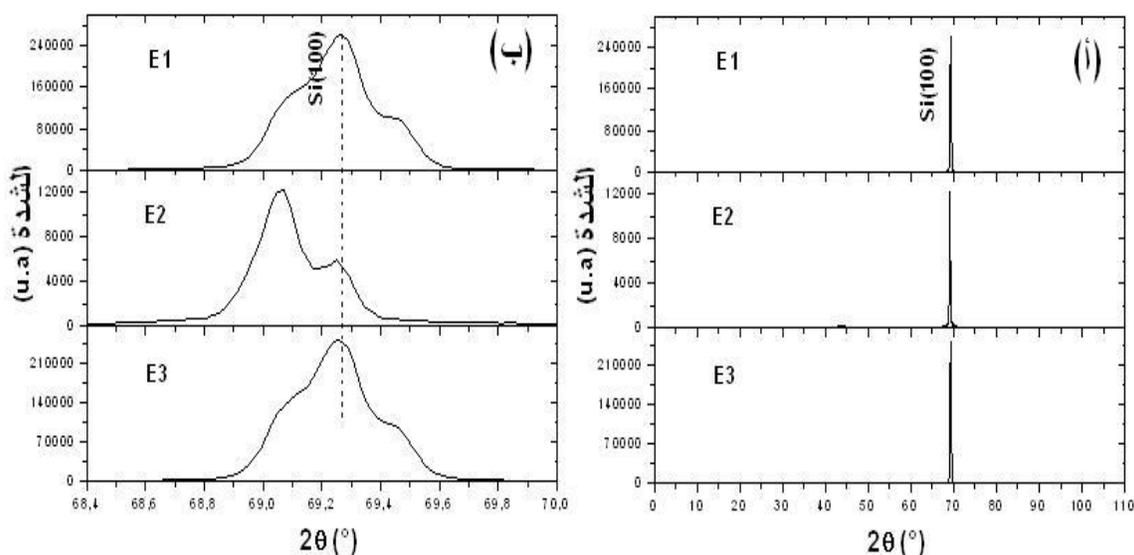
الشكل (99): تكبير أطيف الأشعة السينية الخاصة بالعينات V (المرجع)، S2 و S1 (المزروعة

بالأنتموان) في المجال $2\theta (^\circ) = [28,29]$.

فيما يخص المجموعة الثانية (العينات المزروعة بالزرنيخ)، فإننا تحصلنا على عدة النتائج. من خلال الشكل (100) نلاحظ بأن طيف العينة المرجع (E1) يتكون من ذروة أساسية واحدة، في $2\theta=69.27^\circ$ و هي موافقة للخط المميز Si(100). شدة هذا الخط أعظمية، و هي تدل على النوعية البلورية الجيدة للعينة المرجع. نلاحظ كذلك من خلال الطيف (الشكل (100)) المنسوب للعينة المزروعة و دون معالجة حرارية (E2)، بأن شدة الخط المميز Si(100) في طيف DRX انخفضت بشكل ملحوظ. و هذا يترجم وجود اضطراب كبير في شبكة السليكون حسب عدة مراجع [79،78]. بالإضافة إلى ذلك، لاحظنا وجود انزياح للخط المميز Si(100) مقارنة بالعينة المرجع، حيث قدرنا هذا الفارق بـ $\Delta\theta=0.10^\circ$ الذي يوافق إجهاد داخلي $\varepsilon=0.25\%$. هذه القيمة تترجم وجود اضطراب كبير في شبكة السليكون بعد عملية الزرع.

بعد المعالجة الحرارية، نلاحظ من خلال الطيف (الشكل (100)) الخاص بالعينة (E3)، بأن شدة الخط المميز Si(100) ازدادت مقارنة بالخط المميز الخاص بالعينة التي لم يتم معالجتها حرارياً. هذه الزيادة دليل واضح على أن الشبكة البلورية تم إصلاحها.

نسجل أيضاً بالنسبة للعينة E3 مقارنة بالعينة المرجع، أن هناك انزياح صغير للخط المميز Si(100)، حيث قدرنا هذا الفارق بـ $\Delta\theta=0.01^\circ$. هذا يجعلنا نستنتج بأن هنالك إجهاد داخلي في الشبكة البلورية، حيث تقدر قيمته بـ $\varepsilon=0.03\%$. و هذا راجع إلى حجم ذرة الزرنيخ (المحتلة لمواقع احلالية في الشبكة) التي نصف قطرها أكبر بقليل مقارنة بنصف قطر ذرة السليكون و التي تعمل على زيادة معامل الشبكة (تمدد الشبكة) [127،95].



الشكل (100): (أ) أطيف الأشعة السينية الخاصة بالعينات E1 (المرجع)، E2 و E3 (المزروعة

بالزرنيخ)، (ب) تكبير الأطيف (أ) في المجال $2\theta (^{\circ}) = [68.4, 70]$.

3-3 تحليل العينات بتقنية FTIR :

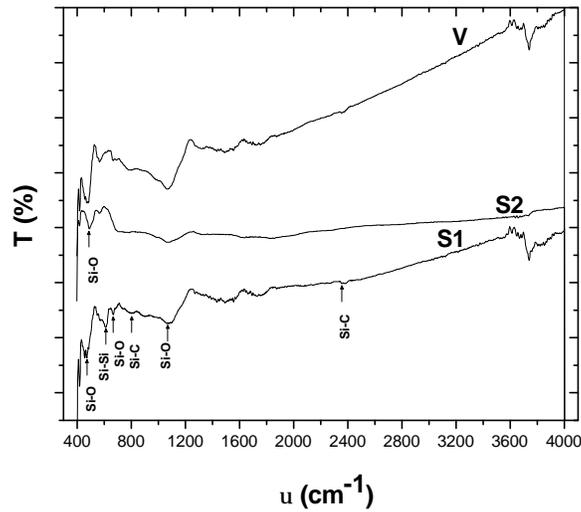
3-3-1 الشروط التجريبية المستعملة في تقنية FTIR :

في هذا العمل، استخدمنا جهاز مطياف بتحويل فورييه ذو النوع Nicolet380. حيث يعمل على إرسال ضوء متعدد الألوان على العينة المدروسة في درجة حرارة الغرفة ، علما بأن هذا الضوء ينتمي إلى حزمة الأشعة تحت الحمراء $\sigma = [400\text{cm}^{-1}-4000\text{cm}^{-1}]$.

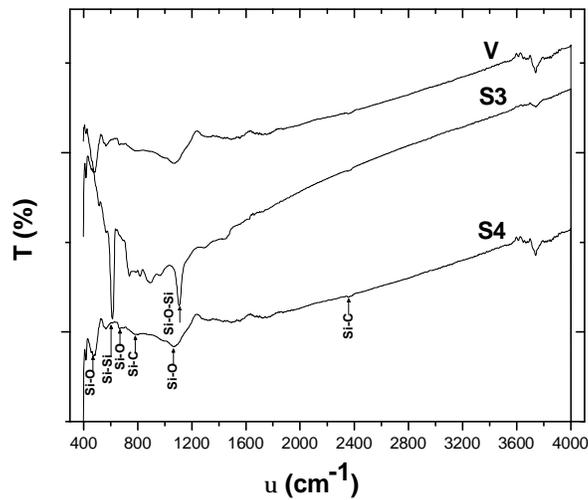
3-3-2 النتائج التجريبية الخاصة بتقنية FTIR :

نلاحظ من خلال الشكلين (101) و (102) الممثلين لمنحنيات التحليل بواسطة الأشعة تحت الحمراء في درجة حرارة الوسط للعينات (V (المرجع)، S1، S2، S3 و S4)، وجود أشرطة امتصاص تمتد من 417cm^{-1} إلى 3739cm^{-1} . و هي التي توافق تردد أنماط الاهتزاز المميزة لبنية كل من Si-O ، Si-Si و Si-C حسب عدة مراجع قامت بدراسات على عينات تحوي السليكون.

بالفعل، نلاحظ وجود ذروات امتصاص عند العدد الموجي 790cm^{-1} و 2357cm^{-1} الموافق لتردد الرابطة Si-C ذو نمط اهتزاز استطالي [128،129]. و هذا ناتج عن تلوث سطح العينات بالكربون خلال تحضيرها و تحليلها. كما نلاحظ أيضا خطوط امتصاص موافقة لـ 475cm^{-1} ، 491cm^{-1} ، 665cm^{-1} و 1058cm^{-1} الموافقة لتردد الرابطة Si-O. الأولين هما ذوي نمط اهتزاز تشوهي دوراني، و أما الآخرين فهما ذوي نمط استطالي [130،131]. كذلك توجد ذروة عند 1107cm^{-1} للرابطة Si-O-Si ذات نمط اهتزاز استطالي غير تناظري [130-133]. هذه الأخيرة ناتجة عن تأكسد سطح العينات في الهواء مباشرة قبل تحليلها. فيما يخص العينات (S1) و (S3) نلاحظ ظهور خط امتصاص عند 614cm^{-1} الذي يوافق الرابطة Si-Si ذو نمط اهتزاز استطالي [132،134]. هذه الرابطة ناتجة عن المكون الأساسي لكل العينات و هو السليكون. بمقارنة الأطياف الثلاث الموجودين في الشكل(101)، نلاحظ بأنه في حالة العينة المزروعة بالانتموان (و التي لم تعالج حراريا)، تم اختفاء معظم خطوط الامتصاص خاصة خط الامتصاص المتواجد في 3739cm^{-1} باستثناء خطوط الخاصة بالرابطة Si-O (التي بقيت تظهر). و هذا راجع إلى الاضطراب الذي حدث في الشبكة البلورية للعينة بفعل الزرع. أما فيما يخص العينة المزروعة و المعالجة حراريا، فقد لاحظنا عودة ظهور جميع خطوط الامتصاص الموجودة في الطيف المرجع. زيادة على ذلك، تم ظهور خط الامتصاص الخاص بالرابطة Si-Si، و هذا راجع إلى إصلاح الاضطراب الذي حدث في الشبكة البلورية للعينة بعد عملية الزرع. فيما يخص العينة S3 بالشكل(102)، ظهر خط الامتصاص الخاص بالرابطة Si-Si و اختفائه في العينة S4 وهذا ربما راجع إلى طبقة الأكسيد SiO_2 الموجودة على سطح العينة.



الشكل(101): مطابقة أطياف الأشعة تحت الحمراء للعينات ((المرجع (V) ، S1 و S2.



الشكل(102): مطابقة أطياف الأشعة تحت الحمراء للعينات ((المرجع (V) ، S3 ، S4.

بالنسبة للأنتمون الذي ينتمي إلى مجموعة الشوائب القريبة من سطح عينة السليكون (shallow impurities in Silicon) لا يظهر خط امتصاصه في الشكلين. ذلك راجع لأنه يتم دراسته في

درجات حرارة منخفضة 11K و في مجال ترددي منخفض أقل من 500cm^{-1} (الأشعة تحت الحمراء البعيدة). بحيث يظهر خط الامتصاص للأنتيمون عند العدد الموجي 294cm^{-1} (بالنسبة للزرنيخ 382cm^{-1}) حسب المرجعين [136،135].

3-4 تحليل العينات بتقنية PL :

3-4-1 الشروط التجريبية المستعملة في تقنية PL :

في مرحلة تحليل العينات بتقنية PL، استخدمنا جهاز مطيافية التآلق الضوئي ذو النوع (LS50B Luminescence Spectrometrie Perkin Elmer). حيث يعمل على إرسال ضوء أحادي اللون على العينة المستعملة في درجة حرارة الوسط. هذا الضوء يصدر من مصباح غزنيون (Xe) ذو طول موجة تقدر بـ 325nm .

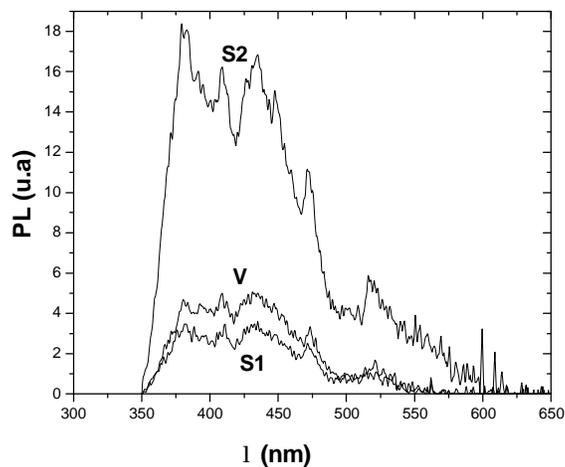
3-4-2 النتائج التجريبية الخاصة بتقنية PL :

نلاحظ في الشكل (103) بان العينة S2 غير معالجة حراريا و المزروعة بالأنتيمون، تصدر ضوءا بشدة جد عالية (أكبر من عينة السليكون المرجعية). هذه الظاهرة من المحتمل ترجع إلى الضرر الكبير الذي نتج عن عملية الزرع على الشبكة البلورية الهدف، و عدم تموقع الانتيمون في المواقع الاحلالية. نفس الملاحظة بالنسبة للعينة S3 في الشكل (104).

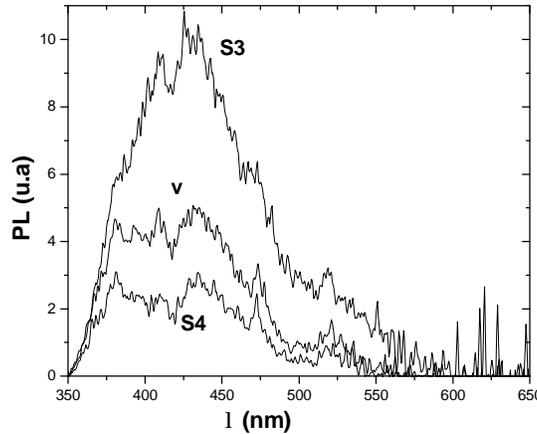
هذه النتائج في توافق مع النتائج المحصل عليها بواسطة التقنيات التجريبية التي قمنا باستعمالها على نفس العينات (FTIR, DRX, RBS). تشير أيضا أنها تتفق مع عدة مراجع من بينها [137،138].

في غياب الأنتيمون (العينة V) نلاحظ في الشكلين (103) و (104) شريط تآلق ضوئي PL ممرز حول 418nm و هو منسوب إلى إعادة التحام الاكستونات (excitons) في السليكون.

في حالة العينة (S1) المزروعة و المعالجة حراريا (الشكل (103))، نلاحظ بأن شدة التألق الضوئي أقل بكثير من العينة (S2) و المزروعة بنفس الجرعة و لكن غير معالجة حراريا. ذلك ناتج بفضل إصلاح العيوب التي حدثت في العينة من جراء الزرع الأيوني، و كذلك تموضع الأنتمون في مواقع تسمح له بتكوين مستوي طاقي للمانحات أقرب إلى عصابة النقل. نفس الملاحظة بالنسبة للعينة S4 في الشكل (104). نلفت النظر بأن إصلاح الضرر الناشئ من الزرع الأيوني، و كذلك تموضع الأنتمون في المواقع المرجوة قد تم التوصل إليهما بفضل التقنيات التجريبية الأخرى: خاصة RBS و DRX. التي أجريت على نفس العينات المعالجة حراريا. كما أنها توافق المرجعين [137،138].



الشكل (103): مطابقة أطيف التألق الضوئي للعينات (المرجع (V)) ، S1 و S2.



الشكل (104): مطابقة أطيف التآلق الضوئي للعينات ((V) المرجع ، S3 و S4.

3-5 تحليل العينات بتقنية الأربع نقاط :

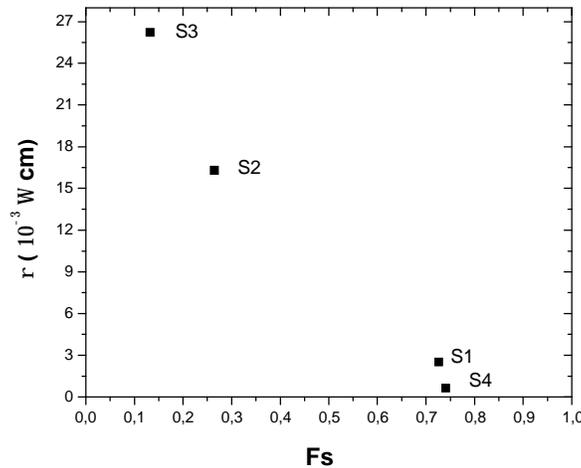
3-5-1 الشروط التجريبية المستعملة في تقنية الأربع نقاط :

في هذا العمل، استخدمنا جهاز لقياس المقاومة ذو النوع EPS-08 Alessi. و هو يحتوي على أربعة نقاط من التنغستن محاذية لبعضها ومتساوية المسافة فيما بينها (و التي تقدر بـ 1mm). التيار الكهربائي المطبق على النقطتين الخارجيتين يقدر بـ 0.3mA. أما بالنسبة للنقطتين الداخليتين فهي تستخدم لتزويدنا بالفرق في الجهد ΔV .

3-5-2 النتائج التجريبية الخاصة بتقنية الأربع نقاط :

لدراسة التنشيط الكهربائي لذرات الأنتموان في الهدف، أنشأنا الشكل (105) الذي يعبر عن تغير المقاومة النوعية للعينات بدلالة الكمية F_S و التي تم حسابها عن طريق المعادلة (49). وجدنا بأن المقاومة تكون متناسبة عكسيا مع الكمية F_S [113] و هذا ما يوافق المرجع [122]. كما نشير بأنها منطقية لأن المقاومة النوعية معروف بأنها متناسبة عكسيا مع عدد الحاملات النشطة n . وفقا للشكل

(105) يمكن أن نستنتج أيضا بان غالبية ذرات Sb توزعت في المواقع الاحلالية للهدف Si (بعد معالجتها حراريا) حيث أصبحت نشطة كهربائيا. وبطبيعة الحال هذه النتيجة متوافقة مع المرجعين [140،139].

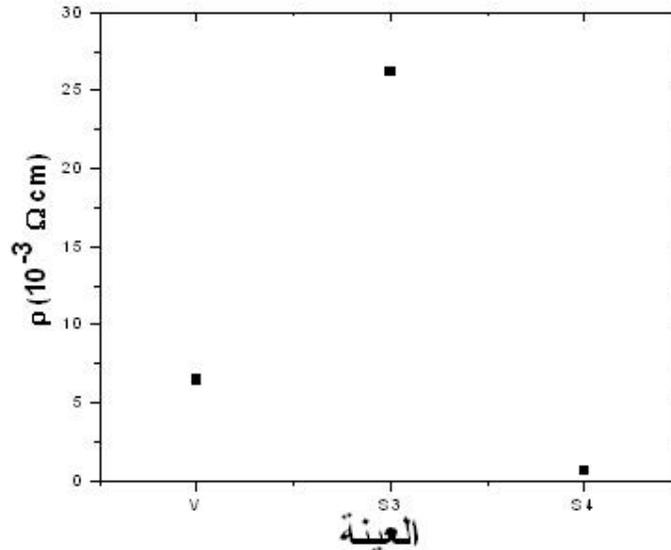


الشكل(105): تغير المقاومة النوعية لمختلف العينات بدلالة الكمية F_s .

في الشكل(106) نعرض تغيرات المقاومة بدلالة كل عينة. حيث وجدنا بأن المقاومة النوعية المتحصل عليها بالنسبة للعينة غير المطعمة تساوي بالتقريب $6.456 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$. تشير هذه القيمة المنخفضة بأن المادة لم تكن مقاومة للغاية و التي كان سببها الخصائص الذاتية للمادة النصف ناقلة (نصف ناقل ذاتي). بعد زرع الايونات Sb^+ في الهدف (Si(111)، قفزت المقاومة حتى $26.212 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ للعينة (S3). سبب الزيادة من المحتمل الضرر الذي أصاب الشبكة البلورية للعينة من جراء الزرع الأيوني لـ Sb^+ ، و الذي كان مهما بالنسبة لهذه الجرعة العالية.

بعد المعالجة الحرارية، انخفضت المقاومة بشكل مهم و بلغت $0.637 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ للعينة S4. و يعزى هذا الانخفاض بشكل منطقي إلى التنفيع الكهربائي للذرات المطعمة (Sb) بواسطة المعالجة الحرارية

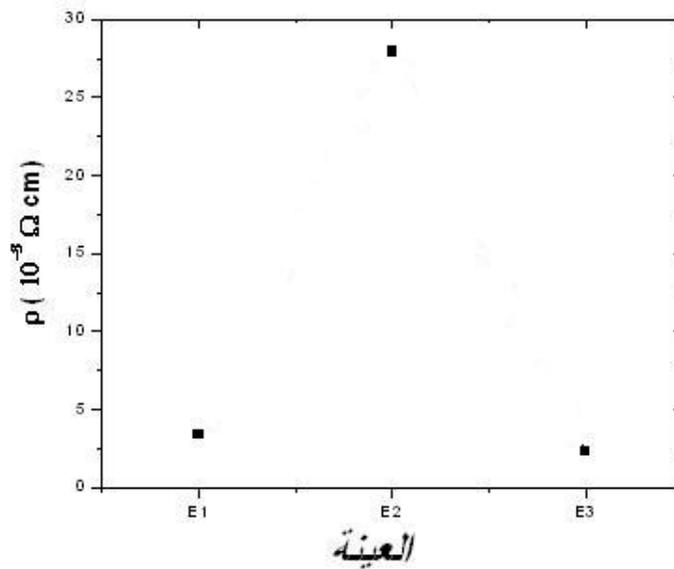
و هو يوافق المراجع [140،95،47]. نلفت النظر إلى أن هذه النتائج كانت مرضية و على توافق تام مع ما كشف عنه بواسطة تقنية RBS و كذا المرجعين [126،95]. كما نلفت النظر بأن نفس التغييرات حصلنا عليها بالنسبة للعينات المزروعة بالجرعة $1.1E15Sb^+cm^{-2}$.



الشكل (106): تغير المقاومة النوعية بدلالة مختلف العينات المزروعة بالانتموان Sb^+ .

فيما يخص العينات المزروعة بالزرنيخ، من خلال الشكل (107)، وجدنا بأن المقاومة النوعية المتحصل عليها بالنسبة للعيينة غير المطعمة تساوي بالتقريب $0.358 \times 10^{-3} \Omega.cm$. حيث تشير هذه القيمة المنخفضة بأن المادة لم تكن مقاومة للغاية و هذا راجع إلى أنها مادة نصف ناقلة ذاتيا. بعد زرع أيونات As^+ في الهدف (Si(100)، قفزت المقاومة حتى $27.927 \times 10^{-3} \Omega.cm$ (العيينة E2). سبب هذه الزيادة من المحتمل أن يكون الضرر الذي أصاب الشبكة البلورية للعينات من جراء الزرع الأيوني لـ As^+ . بعد المعالجة الحرارية (العيينة E3) انخفضت المقاومة بشكل مهم و بلغت $0.298 \times 10^{-3} \Omega.cm$. و يعزى هذا الانخفاض بشكل منطقي إلى التفعيل الكهربائي للذرات المطعمة

(As) بواسطة المعالجة الحرارية. هذا يجعل النتائج المحصل عليها في توافق تام مع ما كشف عنه بواسطة تقنية RBS. بالنسبة للعينات المطعمة بالأنتيمون و كذا مع المرجعين [140،47].



الشكل (107): تغير المقاومة النوعية بدلالة مختلف العينات المزروعة بالزرنيخ As^+ .

4- خاتمة جزئية:

توصيف العينات بواسطة عدة تقنيات تجريبية سمح لنا بالحصول على عدة نتائج تتعلق بمجموعة من العينات. حيث المجموعة الأولى عبارة عن عينات من Si(111) زرعت بأيونات الانتيموان Sb^+ و ذلك بجرعات مختلفة $1E15Sb^+cm^{-2}$ و $1.6E15Sb^+cm^{-2}$ و بطاقة تقدر بـ $120keV$. أما المجموعة الثانية، فهي عبارة عن عينات من Si(100) زرعت بأيونات الزرنيخ As^+ بجرعة و طاقة تقدران بـ $1.5E16As^+cm^{-2}$ و $120keV$ على التوالي. استطعنا أيضا دراسة تأثير المعالجة الحرارية ($900^{\circ}C, 30min$) على إصلاح الأضرار الناتجة عن عملية الزرع و التنشيط الكهربائي للذرات المطعمة بالنسبة للمجموعتين. فيما يخص المجموعة الأولى، النتائج التجريبية المتعلقة بمنحنى توزيع الايونات في عمق الهدف (معاملات الزرع الايوني .., ΔRP , RP) كانت في اتفاق تام مع المحاكاة بواسطة البرنامجين SRIM و C-TRIM. من جهة أخرى لقد بينا بواسطة برنامج المحاكاة RBX سمك الطبقة المتضررة و كذلك بأن المعالجة الحرارية تقود إلى إصلاح جيد لعيوب الزرع و تحسين جيد لناقلية العينات عن طريق التنشيط الكهربائي للشوائب. كذلك بالنسبة للمجموعتين، استطعنا بواسطة تقنية DRX و قياس المقاومة النوعية تحديد مدى الضرر الذي ألحق بالعينات المزروعة و تأثيرها على ناقلية العينة و ذلك بعد عملية الزرع مباشرة. بعد المعالجة الحرارية للعينات المزروعة وجدنا بأن الضرر الناجم عن عملية الزرع قد أصلح و كذلك ناقلية العينة النصف ناقلة تحسنت. نشير إلى أننا قد قمنا باستعمال تقنيات أخرى من أجل تحليل العينات و هي FTIR و التألق الضوئي. النتائج المحصل عليها بفضل هاتين الطريقتين كانتا مؤيدتين للتقنيات الأولية. و على العموم فإن النتائج التجريبية كانت موافقة لعدة مراجع، كما أننا قد قمنا بنشر أهمها في مجلات علمية دولية.

خاتمة عامة

استعرضنا في هذا العمل دراسة عدة معاملات مرتبطة بالزرع الأيوني للأنتيموان أو الزرنيخ في السليكون. بحيث تمت هذه الدراسة على مرحلتين، الأولى تم إجرائها بواسطة المحاكاة و أما الثانية فبواسطة التجربة. في المرحلة الأولى قمنا بدراسة ظواهر الاصطدام بين ايونات الأنتيموان أو الزرنيخ مع الهدف من السليكون غير المبلور بواسطة برنامج SRIM. أما بالنسبة للهدف من السليكون المبلور، فقد تمت الدراسة بواسطة برنامج C-TRIM.

تنبأنا بضياع و تحويل الطاقة و تحصلنا على مختلف توزيعات الأيونات مع تقديرنا لعدة معاملات. من جهة أخرى، دراسة تكوين العيوب هي أيضا أخذت بعين الاعتبار. بحيث استطعنا الحصول على توزيع الفجوات داخل الهدف. في هذه الدراسة كذلك أخذنا بعين الاعتبار ظاهرة الاستثناء الناتجة عن أثر توجيه حزمة الأيونات بالنسبة لسطح العينة و التي يحاكيها برنامج C-TRIM.

في المرحلة الثانية، سمحت لنا التجربة بعمل توصيف بنيوي، فيزيوكيميائي، ضوئي و كهربائي للعينات المحضرة. العينات تحصلنا عليها عن طريق الزرع الأيوني لأيونات Sb^+ وذلك بجرعات مختلفة $1E15Sb^+cm^{-2}$ و $1.6E15Sb^+cm^{-2}$ و بطاقة تقدر بـ $120keV$ في ركائز من السليكون أحادي التبلور ذو التوجيه $\langle 111 \rangle$. لقد أجريت معالجة حرارية على هذه العينات ($900^\circ C, 30min$) من أجل إصلاح الأضرار الناتجة عن عملية الزرع. من جهة أخرى، حضرت عينات من السليكون (100)، حيث زرعت بأيونات الزرنيخ بجرعة $1 \times 10^{16} As^+ / cm^2$ و بطاقة تقدر بـ $100keV$.

الجزء التجريبي تم تنفيذه بعدة تقنيات تجريبية هي RBS، DRX، FTIR، Quatre points و PL. لقد تم الحصول على منحنى توزيع الأيونات في عمق الهدف من خلال محاكاة أطياف RBS بواسطة برامج RUMP، SIMNRA و RBX. يمتلك منحنى التوزيع شكل غوصي مشابه للذي

تنبأنا به. مختلف المعاملات المميزة للزرع الأيوني كانت متقاربة مع بعضها البعض و هي في توافق مع النتائج المتنبأ بها.

من جهة أخرى ساعدنا برنامج RBX على محاكاة أطياف RBS في حالة الاستقناء للحصول على توزيع العيوب داخل الهدف. بالإضافة إلى ذلك، دراستنا لظاهرة الاستقناء كانت لها أهمية كبيرة في تحديد نسبة الذرات التي احتلت المواقع الاحلالية و كذلك تحديد سمك الطبقة المتضررة من جراء الزرع.

فيما يخص المعالجة الحرارية، فإننا درسنا أثرها على إصلاح الضرر الناجم عن زرع أيونات Sb^{+} في السليكون. بحيث التحاليل التي أجريت بينت بأننا حصلنا على إصلاح جيد للأضرار و تنشيط الشوائب المضافة التي تعمل على تحسين الخصائص الكهربائية للعينات.

المراجع

- [1] شريف أحمد خيرى، حسن حسين حسن، "أشباه المصلات"، الطبعة الأولى، دار الفكر العربي، القاهرة، (2002).
- [2] محمد أمين سليمان، أحمد فؤاد باشا، شريف أحمد خيرى، "فيزياء الجوامد"، الطبعة الأولى، دار الفكر العربي، القاهرة، (2000).
- [3] J-J. Rousseau, A. Gibaud, "Cristallographie Géométrique et Radiocristallographie", 3^e edition, DUNOD, Paris, (2007).
- [4] C. M. Roebuck, "Excel Preliminary Chemistry", Pascal Press, Glebe Australia, (2000).
- [5] A. Mohan, "Understanding Practices of Weight Management", OnlineGatha-the Endless Tale, Lucknow Uttar Pradesh India, (2014).
- [6] S. S. Ray, "Clay-Containing Polymer Nanocomposites: from Fundamentals to Real Application", Elsevier B V, (2013).
- [7] F. Lévy, "Physique et technologie des semiconducteurs", presses Polytechniques et universitaire romandes, Lausanne, (1995).
- [8] I. Auirre, M-A. Van de Wiel, "Introduction à la chimie générale", Tome2 chimie minérale, De Boeck & Larcier s a, (1988)
- [9] J. Kotz, P. Treichel, J. Townsend, "Chemistry & chemical Reactivity", Brooks Cole, USA (2010).
- [10] C. Mascle, W. Wygowski, "Fabrication avancée et méthodes industrielles", Tome 2, Presse Internationales Polytechnique, canada, (2013).
- [11] B. J. T. Dobbs, "The Foundations of Newton's Alchemy", Cambridge University Press, USA, (1975).
- [12] C-Y. Wang, "Antimony: its History, Chemistry, Mineralogy, Geology, Metallurgy, Uses, Preparations, Analysis, Production, and Valuation; with complete Bibliographies for Students, Manufacturers, and Users of Antimony", Andesite Press, (2015).
- [13] C. G. Anderson, " The metallurgy of antimony ", *Chemie der Erde*, 72, S4, 3–8 (2012).
- [14] N.S. Bennett, N.E.B. Cowern, A.J. Smith, R.M. Gwilliam, B.J. Sealy, L. O'Reilly, P.J. McNally, G. Cooke, H. Kheyrandish, "Highly Conductive Sb-doped Layers in Strained Si", *Appl. Phys. Lett.* 89, 182122, (2006).
- [15] N. S. Bennett, H. H. Radamson, C. S. Beer, A. J. Smith, R. M. Gwilliam, N. E. B. Cowern, B. J. Sealy, "Enhanced n-type dopant solubility in tensile-strained Si", *Thin Solid Films*, 517, 331, (2008).
- [16] W. R. Chappell, C. O. Abernathy, R. L. Calderon, "Arsenic Exposure and Health Effects III", Elsevier Science Ltd, UK, (1999).

- [17] G. F. Nordberg, B. A. Fowler, M. Nordberg, "Handbook on the Toxicology of Metals", Elsevier B.V, (2015).
- [18] J. C. Pommerville, "Fundamentals of Microbiology: Body Systems Edition", Jones & Bartlett Learning LLC an Ascend Learning Company, Burlington USA, (2016).
- [19] O. Selinus, R. B. Finkelman, J. A. Centeno, "Medical Geology: A Regional Synthesis", Springer Science+Business Media B.V, (2010).
- [20] J. M. Stellman, "Encyclopédie de sécurité et de santé au travail", Organisation Internationale du Travail, Genève, Vol 2, (2000).
- [21] C. Kittel, "Physique de l'Etat Solide", Ed. Dunod, 5ème édition, Paris, (1983).
- [22] B. Valeur, "Technique d'Ingénieur, Constantes Physico-Chimique, Propriétés des Eléments", K80, (2003).
- [23] J.C. Bailar.HJ. Element, Sir. Ronald Nyholm, A.F. Frootman-Dickenson, "Comprehensive Inorganic Chemistry", Vol. 1, p. 1333, Vol. 2. p. 555, 577, Pergamon press, (1973).
- [24] R. Legros, "Physique des Semi-conducteurs Technologie-diodes", Tome 1, Editions Eyrolles, (1974).
- [25] A. Anders, "Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition", Wiley, (2000).
- [26] B. Schmidt, K. Wetzig, "Ion Beams in Materials Processing and Analysis", Springer-Verlag Wien, (2013).
- [27] A. Bensaada, "Technologie des Semi-conducteurs", Office des Publications Universitaires, Alger, (1994).
- [28] M. C. Wintersgill, "Ion implantation in polymers", Nucl. Instrum. and Meth. B1, p.595, (1984).
- [29] site web:
http://www.vanderbilt.edu/exploration/news/features/vo2shutter/news_shutter2.htm
- [30] site web: <http://www.ion-beam-services.com>.
- [31] R. Agarwal, L. Sahoo, "VLSI Technology and Design", Technical Publication Pune, (2008).
- [32] P.D. Townsend, P.J. Chandler, L. Zhang, "Optical effects of Ion Implantation", Cambridge University Press, (1994).
- [33] L. Ottaviani, "Réalisation de Jonctions pn dans le Carbure de Silicium 6H par Implantation Ionique d'Aluminium", Thèse de doctorat, Lyon, (1999).

- [34] P. N. Favennec, "L'Implantation Ionique pour la Microélectronique et l'Optique", Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, ENST, Ed. Masson, Paris, (1993).
- [35] H. F. Etienne, "étude de l'implantation ionique dans les miroirs multi-couches Mo/Si : applications aux optiques diffractives", thèse de l'institut national des sciences appliquées, Toulouse, (2005).
- [36] Lindhard, Scharff, Schiott, "Range Concepts and Heavy Ion Ranges", Mat. Fys. Medd., 33, (1963).
- [37] M. Nastasi, J. W. Mauer, J. K. Huvonen. Ion-Solid Interaction : "Fundamentals and Application", University Press Combridge, (1995).
- [38] C. Iliadis, "Nuclear Physics of Stars", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, (2007).
- [39] Lindhard, scharff, "Energy Dissipation by Ions in the keV Region", Phy. Rev., 124(1), p. 128, (1961).
- [40] A. Baudrant, "Silicon Technologies: Ion Implantation and Thermal Treatment", ISTE Ltd, London, (2011).
- [41] D. Fink, "Fundamentals of Ion-Irradiated Polymers, Materials Science", Springer-Verlage Berlin Heidelberg,(2004).
- [42] A. Baudrant, "Implantation ionique et traitements thermique en technologie silicium", Lavoisier, paris, (2011).
- [43] M. Nastasi, J.W. Mayer, J.K. Hirvonen, "Ion Solid Interactions Fundamentals and Applications", Cambridge university press, (1996).
- [44] H. Bernas, "Materials Science with Ion Beams", Springer Verlag Berlin Heidelberg, (2010).
- [45] K. Esmark, H. Gossner, W. Stadler, "Advanced Simulation Methods for ESD Protection Developement", Elsevier.Ltd,(2003).
- [46] E. Rimini, "Ion Implantation Basics To Device Fabrication", Springer science Business media New York,(1995).
- [47] J. S. Williams, "Solid phase epitaxial regrowth phenomena in silicon", Nucl. Inst. Meth. 209/210, 219-228, (1983).
- [48] R.Hellborg, H.J. Whitlow, Y. Zhang, "Ion beams in nanosciences and technology", Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 103-105, (2009).

- [49] M.T.Robinson and I.M. Torens, "Computer simulation of atomic-displacement cascades in solids in the binary-collision approximation", Physical Review B,9(12),5008-5024,(1974).
- [50] M.T. Robinson, "The binary collision approximation Background and effects in solids", 130(1),3-20,(1994).
- [51] G. Hobler and S. Selberherr, "Monte carlo simulation of ion implantation into two and three dimensional structures", IEEE Transactions on computer Aided Design of integrated circuits and systems, 8(5),450-459,(1989).
- [52] J. F. Ziegler, J.P. Biersack, U. Littmark, " the stopping and range of ion in matter",Vol.1, Pergamon Press, New York, (1985).
- [53] J.P.Biersack, L.G. Haggmark, "A Monte carlo computer program for the transport of energetic ions in amorphous targets", Nucl Inst and Meth, 174, 257, (1980).
- [54] site web:<http://www.srim.org>.
- [55] site web: http://www.fzd.de/FWI/FWIT/FILES/Manual_Crystal-TRIM.pdf
- [56] O.S. Oen , M.T. Robinson, "Computer studies of the reflection of light ions from solids", Nucl. Instr. Meth, 132, 647, (1976).
- [57] M. Posselt, J.P. Biersack, "Computer simulation of ion implantation into crystalline target", Nucl. Instr. Meth, B64, 706, (1992).
- [58] K.M. Klein, C. Park and A.F. Tasch, "MRS Fall Meeting", Boston, USA, in press, (1990).
- [59] M. Posselt, "Crystal-trim and its application to investigations on channeling effects during ion implantation", Radiation Effects and Defects in Solids, 130-131:1, 87-119, (1994).
- [60] R. Behrisch,W. Eckstein, "Sputtering by Particle Bombardment: Experiments and Computer Calculations from Threshold to MeV Energies", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2007).
- [61] W. A. Grant , "Methods of surface analysis", ed. J.M.Walls, VG. Ionex, UK, Cambridge University, p. 299, (1989).
- [62] W. K. Chu, J. W. Mayer and M. A. Nicolet, "Backscattering spectroscopy", Academic Press, New york, (1978).
- [63] M. H. Breese, D.N. Jamieson, P.J.C. King, "Materials Analysis Using a Nuclear Microprobe", ed. John Wiley & Sons, (1996).
- [64] S. Agouram, "Caractérisation de Couches Minces d'Oxynitrures de Chrome Produites par Pulvérisation Cathodique Réactive en Présence d'Air : Influence de Pression de Vapeur d'Eau Contenue dans le Plasma", Thèse de doctorat, Univ., Notre-Dame de la paix, Namur, (2003).

- [65] G. Kraft, "Tumor therapy with heavy charged particles", *Progress in Particle and Nuclear Physics*, Vol. 45, p. S473-S544, (2000).
- [66] D. V. Morgan, "Channelling theory observation and applications", John Wiley & Sons Ltd, New York, (1973).
- [67] D. S. Gemmell, "Channeling and related effects in the motion of charged particles through crystals", *Rev. Mod. Phys.* 46, 129-227, (1974).
- [68] S. T. Pieraux, "New uses of ion accelerators", Ed. J. F. Ziegler, Plenum Press, New York, (1975).
- [69] G. R. Piercy, F. Brown, J. A. Davies, M. Mc-Cargo, "Experimental Evidence for the Increase of Heavy Ion Ranges by Channeling in Crystalline Structure", *Phys Rev Lett*, vol.10, issu.9, P.399, (1963).
- [70] H. Lutz, R. Sizman, "Super ranges of fast ions in copper single crystals", *Phys.Lett*, 5, P.113, (1963).
- [71] J. Lindhard, *Kgl. Dan.Vid. Sels. Mat. Fys. Madd*, vol. 34, issu.14, (1965).
- [72] A. Benyagoub, L. Thomé, "Quantitative analysis of channeling data for the determination of the amorphous fraction in ion bombarded single crystals", *Radiat. Eff.* 105, 9, (1987).
- [73] W.J. Weber, R.C. Ewing, C.R.A. Catlow, T. Diaz de la Rubia, L.W. Hobbs, C. Kinoshita, Hj. Matzke, A.T. Motta, M. Nastasi, E.K.H. Salje, E.R. Vance, S.J. Zinkle, "Radiation effects in crystalline ceramics for the immobilization of high-level nuclear waste and plutonium", *Mater. Res.* Vol. 13, N°6, (1998).
- [74] C. Degueldre, J. M. Paratte, "Basic properties of a zirconia-based fuel material for light water reactors", *Nucl. Technol.* 123, 21 (1998).
- [75] A. Gentils, "Effets d'irradiation et comportement des produits de fission dans la zircone et le spinelle". 179p, Th. : Rayonnements et Environnement, Univ Paris XI Orsay, (2003).
- [76] Y. Quere, "Étude de défauts cristallins par canalisation", *Ann. Phys*, t5. pp. 105-138, (1970).
- [77] Site Web : <https://sites.google.com/a/lbl.gov/rbs-lab/ion-beam-analysis/ion-channaling>
- [78] J.A. Borders, J.M. Poate, "Lattice-site location of ion-implanted impurities in copper and other fcc metals", *Phys.Rev. B* 13 (3), 969, (1976).

- [79] L.R. Doolittle, "Algorithms for the rapid simulation of Rutherford backscattering spectra", Nucl. Instr. Meth, Vol. B9, P. 344, (1985).
- [80] L. R. Doolittle, "A semiautomatic algorithm for rutherford backscattering analysis", Nucl. Instr. and Meth. B 15, 227, (1986).
- [81] J. W. Mayer, and M.-A. Nicolet, "Ion Beam Handbook for Materials Analysis", Academic press, New York, (1977).
- [82] Site Web: <http://www.genplot.org>.
- [83] Site Web: <http://home.mpcdf.mpg.de/~mam/>
- [84] R. Hellborg, "Electrostatic Accelerators: Fundamentals and Applications", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2005).
- [85] W. Chu, Phys. Rev. A13, 2057,(1976).
- [86] Q. Yang, D. J. O'Connor, Z.Wang, "Empirical formulae for energy loss straggling of ions in matter" , Nucl. Instrum. Methods B61, 149, (1991).
- [87] M. Mayer, SIMNRA, "a simulation program for the analysis of NRA, RBS and ERDA, AIP Conference Proceedings", 475, 541-544, (1999).
- [88]. M. Mayer, "SIMNRA User's Guide", Report IPP 9/113, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Germany, (1997).
- [89] M. Mayer, "SIMNRA User's Guide", Version 4.4, Part of the program package SIMNRA.
- [90] E. Kótai, "Computer methods for analysis and simulation of RBS and ERDA spectra", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 85, p. 588, (1994).
- [91] E. Kótai , RBX, "computer methods for analysis and simulation of RBS and ERDA spectra", AIP Press Conf. Proc., 392, p. 631, (1997)
- [92] V. H. Nguyen, H.V. Kranenburg, P.H. Woerlee, "Copper for advanced interconnect", IWOMS99, Hanoi, (1999).
- [93] J. D. Mac Brayer, R.M. Swanson and T.W. Sigmon, "Diffusion of Metals in Silicon Dioxide", Journal of the Electrochemical. Society, 133, (6, p. 1243), (1986).
- [94] L. Pi-Jun et al, "Lattice straininduced by ion implantation in AlGaAs/AlGaInAs quantum wel samples",Chin. Phys. Lett, Vol. 19, N. 4, 599-601, (2002).
- [95] A. Zamani, "Antimony implanted strained Si for nMOSFET applications", M.Sc. Thesis, Nanotechnology Program, Université d'Uppsala, Suède, (2009).
- [96] N. Kazuhiro et al, J. Appl. Phys, 37, 4231, Japan, (1998).
- [97] Annual Book of ASTM Standards Part 43 F121-80, (1981).

- [98] T. D. Dzhafarov, S. A. Yuksel, "Nanoporous Silicon-Based Ammonia-Fed Fuel Cells", INTECH, Rijeka, Croatia, pp.309-345, (2011).
- [99] G. Herzberg, D. V. Nostrand, "Molecular Spectra and Molecular Structure II Infrared and Raman Spectra of Polyatomic Molecules", Company Inc. New-York, 130 (1946).
- [100] A. Beran, D. Voll, H. Schneider. "IR spectroscopy as a tool for the characterization of ceramic precursor phases", EMU Notes in Mineralogy 6(Chap.5): 189-226, (2004).
- [101] T. H. Gfroerer, "Photoluminescence in Analysis of Surfaces and Interfaces", In Encyclopaedia of Analytical Chemistry; Meyers, R. A., Ed.; John Wiley and Sons Ltd.: Chichester, p 9209-9231, (2000).
- [102] S.Yano, T.Goto, T.Itoh, A.Kasuga, "Dynamics of excitons and biexcitons in CuCl nanocrystals embedded in NaCl at 2 K", Phys.Rev. B(55).N.3, 1667, (1997).
- [103] J. Pankov, "Optical processes in semiconductors", prentice hall ,NJ, (1971).
- [104] منذر نداف، فوزي عوض، "تحضير السليكون المسامي و دراسة بعض خواصه الضوئية"، تقرير عن دراسة علمية مخبرية، هيئة الطاقة الذرية، سوريا، (2006).
- [105] M. J. Kerr and A. Cuevas, "Very low bulk and surface recombination in oxidized silicon wafers", Semicond. Sci. Technol., 17(1), 35, (2002).
- [106] H. Serrar, "Etude théorique et expérimentale de l'implantation ionique de Sb dans Si", Mémoire de Magister, Université les Frères Mentouri Constantine I, Algérie, (2007).
- [107] V. Narayanan, F. Roozeboom, D-L. Kwong, H. Iwai, E. P. Gusev, P. J. Timans, "Advanced Gate Stack, Source/Drain, and Channel Engineering for Si-Based CMOS 5: New Materials, Processes, and Equipment", Vol.19, N.01, Electrochemical Society, USA, (2009).
- [108] Reed Business Information, "New Scientist", Vol. 116, N. 1587, IPC Magazines, USA, (1987).
- [109] O. Manasreh, "III-Nitride Semiconductors: Electrical, Structural and Defects Properties", Elsevier Science B.V, Netherlands, (2000).
- [110] M. D. McCluskey, E. E. Haller, "Dopants and Defects in Semiconductors", Taylor & Francis Group, LLC, London, (2012).
- [111] G. Hellings, K. D. Meyer, "High Mobility and Quantum Well Transistors: Design and TCAD Simulation", Vol. 42, Springer Science+Business Media Dordrecht, (2013).
- [112] A. Bouguerra, R. Labbani, "Simulation of Carbon Ions Interactions with Monocrystalline Silicon Targets", Acta Physica Polonica A, Vol. 128, No. 2-B, (2015).
- [113] H. Serrar, R. Labbani, C. Benazzouz, "Experimental Characterization of Antimony Dopant in Silicon Substrate", Acta Physica Polonica A, Vol. 129, N. 1, (2016).

- [114] R. Labbani, H. Serrar, C. Benazzouz, "Characterization of Silicon Surfaces Implanted with Antimony Ions and Submitted to Annealing and Ageing Treatments", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 12, N. 8, 6864-6868, (2012).
- [115] R. Labbani, R. Halimi, Z. Chafi, "Study of radiation damage restoration and antimony ions redistribution in Si(100) and Si(111) crystals ", *Nuc.Ins. Meth. Phys. Res. A*, 480, 178-184, (2002).
- [116] R. Labbani, R. Halimi, "Substrate influence on the outdiffusion of antimony dopant in monocrystalline silicon", *Mater. Sci. Eng. B* 124-125, 208-282, (2005).
- [117] R. Labbani, R. Halimi, T. Laoui, A. Vantomme, B. Pipeleers, G. Roebben, "Characterization of Si(111) crystals implanted with Sb⁺ ions and annealed by rapid thermal processing ", *Mater. Sci. Eng. B* 102, 390-397, (2003).
- [118] H. Guendouz, "Etude de couches minces de silicium implantées à l'antimoine ou l'arsenic", *Mémoire Magister en physique*, Univ Constantine 1, (2014).
- [119] J. Narayan, O.W. Holland, "Solid phase epitaxial growth in ion-implanted silicon", *Physica Status Solidi*, A 73, 225, (1982).
- [120] A. Sato, K. Suzuki, H. Horie, T. Sugii, "Determination of solid solubility limit of In and Sb in Si using bonded silicon-on-insulator (SOI) substrate", in: *Proc. IEEE Int. Conf. Microelectron. Test Struct.*, IEEE, Nara, p. 259, (1995).
- [121] S. Mammeri, "Étude de la pulvérisation induite par des ions de gaz rares (Ar⁺, Kr⁺) de basses énergies ($E < 200$ keV) dans des cibles solides d'aluminium, d'or et de bismuth", *Thèse Doctorat en sciences en Physique*, Univ des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, (2010).
- [122] C. Benazzouz, N. Boussaa, S. Behli, M. Zilabdi, S. Tobbech, M. Derdour, "Study by channeling of heavily antimony-doped silicon by ion implantation and thermal annealing", *Alg. Rev. Nucl. Sci.* 2, 119,(1997).
- [123] D. Buca, W. Heiermann, H. Trinkaus, B. Hollander, U. Breuer, S. Mantl, "High temperature antimony ion implantation in strained silicon-on-insulator", *Solid-State Electronics* 53, 828–832, (2009).
- [124] R. Labbani, H. Serrar, L. Baouni, " Experimental characterization of monocrystalline Si targets implanted with Sb⁺ ions", *Nuc.Ins. Meth. Phys. Res. A*, 613, 415-418, (2010).
- [125] T. E. Jenkins, "Semiconductor Science-Growth and Characterization Techniques", *Prentice Hall International Limited*, UK, (1995).

- [126] J. F. Ziegler, "Ion Implantation Technology", Elsevier Science Publishers, B. V. North-Holland, (1992).
- [127] K. P. O'Donnell, V. Dierolf, "Rare-Earth Doped III-Nitrides for Optoelectronic and Spintronic Applications", Canopus Academic Publishing Limited, (2010).
- [128] T. Kaneko, D. Nemoto, A. Horiguchi, N. Miyakawa, "FTIR analysis of a-SiC:H films grown by plasma enhanced CVD", Journal of Crystal Growth, 275, e1097–e1101, (2005).
- [129] B. Shokri, M. Abbasi Firouzjah, S. I. Hosseini, "FTIR analysis of silicon dioxide thin film deposited by Metal organic-based PECVD", 19th International Symposium on Plasma Chemistry, Bouchum, (2009).
- [130] D.S.McLachlan, M. Blaszkiewicz, R. E. Newnham, "Electrical Resistivity of Composites", J. Am. Ceram. Soc, 73, 2187, (1990).
- [131] F. REBIB, "Etude structurale, optique et électrique de couches minces d'oxynitride de silicium déposées par pulvérisation cathodique radiofréquence réactive", Thèse de Doctorat, Univ Blaise Pascal, France, (2006).
- [132] Y. K. Xu, S. Adachi, "Properties of green-light-emitting anodic layers formed on Si substrates in HF/MnO₂ mixed solution", J.App.Phys.105,113525, (2009).
- [133] K. L. Pong, S. C. Chen, K. W. Cheah, "Photoluminescence of laser ablated silicon", Solid State Communication, 99, 887, (1996).
- [134] I. Mihalcescu, M. Ligeon, F. Mullen, R. Romestain, J. C. Vial, "Surface passivation: a critical parameter for the visible luminescence of electrooxidised porous silicon", Journal of Luminescence, 57, 111, (1993).
- [135] W. S. Lau, "Infrared Characterization for Microelectronics", World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore,(1999).
- [136] K. Nishikida, E. Nishio, R. W. Hannah, "Selected Application of Modern FT-IR Techniques", Kodansha Ltd,Tokyo,(1995).
- [137] C. Christofides, G. Ghibardo, "Effect of Disorder and Defects in Ion-Implanted Semiconductors: Optical and Photothermal Characterization",Vol. 46, Academic Press, USA, (1997).
- [138] A. W. Czanderna, T. E. Madey, C. J. Powell, "Beam Effects, Surface Topography, and Depth Profiling in Surface Analysis",Vol. 5, Kluwer Academic Publishers, (2002).
- [139] J. F. Letcher, J. Narayan, O. W. Holland, Inst. Phys. Conf. Ser. 60, 265, (1981).
- [140] J. D. Plummer, M. D. Deal, P. B. Griffin, "Silicon VLSI technology", Publisher printice hall, (2000).

الملحق 1

ترجمة بعض المصطلحات
العلمية

الانجليزية	الفرنسية	العربية
Optimization	Optimisation	أمثلة ، استمثال
Back-scattering	Rétrodiffusion	الانتشار الارتدادي
Ion implantation	Implantation ionique	الزرع الأيوني
Diffusion	Diffusion	الانتشار
Monocrystalline	Monocristallin	أحادي التبلور
Amorphous	Amorphe	غير مبلور، لابلوري
Annealing	Recuit	تلدين
Tilt Angle	Angle d'inclinaison	زاوية الإمالة
Channeling	Canalisation	الاستقناء
Dechanneling	Décanalisation	غير مستقناة
Focalization	Focalisation	التبئير، التركيز
Resolution	Résolution	درجة الوضوح، درجة الاستبانة
Skewness	Obliquité	الميلان ، الانحراف
Kurtosis	Courbure, aplatissement	التفرطح (انبساط، توسع)
Collimator	Collimateur	مسدد
Straggling	Dispersion	متناثر، تشتت، تبدد
Characterization	Caractérisation	توصيف، دراسة الخصائص
Diffraction	Diffraction	انعراج، حيود
Crystallite	Cristallites	بلور صغير (كريستاليت)، حُبَيْبَة بَلُورِيَّة
Substrate	Substrat	ركيزة ، مسند
Damaged	Endommagé	متضرر، تالف
Standard, normalized	Standard, normalisé	قياسي ، معياري
Yield	Rendement	مردود

Interstitial	Interstitiel	انغراسي
Substitutional	Substitutionnel	احلالي
Penetration	Pénétration	اختراق، تغلغل
Peak	Pic	قمة، ذروة
Stretching	Elongation, étirements	استطالة، تمدد
Wagging	Agitation	ارتجاج، ارتجاج، اهتزاز
Bending	flexion	الانحناء
Scissoring	Cisaillement	القص
Rocking	Balancement	التأرجح، التمايل
Twisting	Torsion	فتلي، التوائي

الملحق 2

قائمة لأهم الرموز
و الاختصارات

- BCA : تقريب التصادمات الثنائية (Binary Collision Approximation).
- CRYSTAL-TRIM : برنامج لمحاكاة زرع الأيونات في المادة.
- DRX : (La diffraction des rayons X) مطيافية انعراج الأشعة السينية.
- FTIR : (la Spectroscopie InfraRouge à Transformée de Fourier) مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه.
- IBA : (Ion Beam Analysis) تحليل الحزمة الأيونية.
- LSS : نظرية تفاعل ايون مع مادة غير مبلورة، يستعمل فيها كمون حسب النموذج الذري لـ طوماس-فيرمي، اختصار لثلاثة أسماء (Lindhard, Scharaff, Schiott).
- PL : (La Spectroscopie de Photoluminescence) مطيافية التألق الضوئي.
- RBS : (la Spectroscopie de Rétrodifusion Rutherford) مطيافية الانتشار الارتدادي لروذرفورد.
- RBS/C : مطيافية الانتشار الارتدادي لروذرفورد باستعمال هندسة الاستقناء.
- RBX : برنامج لمحاكاة أطياف RBS في الهندسة العشوائية و الموجهة.
- RUMP : برنامج لمحاكاة أطياف RBS في الهندسة العشوائية.
- SIMNRA : برنامج لمحاكاة أطياف RBS في الهندسة العشوائية.
- SIMS : (La spectrométrie de masse à ionisation secondaire) مطيافية الكتلة بالتأين الثانوي.
- SRIM : (Stopping and Range of Ions in Matter) برنامج محاكاة توقف و مسار الأيونات في المادة.
- TRIM : (Transport of Ions in Matter) برنامج محاكاة انتقال الايونات في المادة.

Van De Graaf : تسمية مسرع الجسيمات نسبة لمكتشفه.

ZBL : اختصار لثلاثة أسماء (Ziegler, Biersack, Lindhard) اقترحوا كمون كولومبي للحجب.

$d\sigma$: المقطع التفاضلي الفعال.

$d\Omega$: الزاوية الصلبة للكشف.

$d\sigma/d\Omega$: المقطع الفعال للانتشار المرن.

$f\left(\frac{r}{a}\right)$: دالة الحجب.

Φ : الجرعة الكلية المزروعة تقدر ب (ions/cm²).

$\Phi(r)$: دالة الحجب ذات النوع طوماس-فيرمي.

γ (Skewness) : الانحراف (الميلان).

β (Kurtosis) : التفرطح.

θ : زاوية الارتداد.

θ_1 : الزاوية بين الحزمة الواردة والناظم على سطح العينة.

θ_2 : زاوية الحزمة المرتدة بالنسبة للناظم على سطح العينة.

2θ : زاوية الانعراج.

θ_B : زاوية الانعراج لبراغ.

σ : العدد الموجي.

λ : الطول الموجي.

ν : تردد الموجة.

ρ : المقاومة.

$\varepsilon(E_0)$: قدرة التوقف للمادة عند الطاقة E_0 .

$\varepsilon(KE_0)$: قدرة التوقف للمادة عند الطاقة KE_0 .

ε : الإجهاد.

ψ_c : الزاوية الحرجة للاستقناء.

ψ_1 : الزاوية الحرجة باستعمال كمون طوماس-فيرمي.

$\psi_{1/2}$: عرض منتصف الارتفاع لمنحنى المسح الزاوي.

χ_{min} : مردود الاستقاء.

χ_R : نسبة الأيونات الغير مستقناة.

χ_S : مردود الانتشار الارتدادي المباشر.

$c_{min}^{impurete}$: المردود الأدنى لبئر الاستقناء من اجل الشوائب.

$c_{min}^{cristal}$: المردود الأدنى لبئر الاستقناء من اجل البلورة.

Δa : الفرق بين ثابت الشبكة للعينة المزروعة و العينة المرجع.

Δd : الفرق بين المسافة البنينة لمجموعة المستويات للعينة المزروعة و العينة المرجع.

$\Delta \theta$: الفرق بين زاوية الخط المميز للعينة المزروعة و العينة المرجع.

ΔR_p : الانحراف المعياري المتوسط.

ΔR_{\perp} : الانحراف الجانبي.

ΔE_{el} : ضياع الطاقة الالكترونية.

ΔX : مسافة جزئ من عمق الهدف.

a : نصف قطر الحجب لطوماس-فيرمي.

a_0 : نصف قطر بور.

As : العنصر الكيميائي الزرنيخ.

C : سرعة الضوء.

D : الكثافة الالكترونية للهدف.

D_0 : الجرعة التجريبية.

d : المسافة الذرية على طول المحور المعتبر.

d_{hkl} : المسافة البينية لمجموعة المستويات (hkl).

e : سمك الطبقة الناقلة.

E : طاقة الأيون.

E_d : الطاقة الأدنى التي يجب تحويلها للذرة الهدف من أجل إزاحتها من موقعها و خلق فجوة.

E_{ion} : طاقة الأيون بعد التصادم.

E_{atome} : الطاقة المحولة إلى الذرة الهدف.

E_n : تراكم الطاقة النووية في اصطدام قذيفة مع ذرة الهدف.

E_0 : الطاقة الابتدائية للجسيم الوارد.

E_1 : طاقة الجسيم الوارد بعد التصادم.

E_g : طاقة النطاق.

E_{\perp} : المركبة العرضية لطاقة الأيون.

F_S : نسبة الذرات المتموضعة احلاليا.

h : ثابت بلانك.

I : شدة الحزمة الصادرة عن العينة.

I_0 : شدة الحزمة الواردة.

- K : عامل الحركة.
- M_1 : كتلة الأيون الوارد.
- M_2 : كتلة نواة الذرة الهدف.
- N : التركيز الذري للهدف.
- $n(x)$: توزيع الأيونات المزروعة في العمق.
- N_d : عدد الإزاحة الناتج عن أول قذيفة افتراضية في عمق المجال.
- P : معامل التأثير و هو يمثل المسافة الأدنى بين مراكز الأنوية.
- P_v : احتمال أن يكون موقع في الشبكة محتلا من قبل فجوة.
- r : مسافة التفاعل.
- R_d : العمق الذي يوافق التوزيع الأعظمي للعيوب داخل الهدف.
- R_p : مسقط المسار المتوسط.
- R_C : المقاومة المربعة.
- S : مسافة بين مسمارين معدنيين الخاصين بالجهاز قياس المقاومة.
- Si : العنصر الكيميائي السليكون.
- Sb : العنصر الكيميائي الأنتموان.
- $S(E)$: قدرة التوقف الكلية.
- $S(E)_n$: قدرة التوقف النووي.
- $S(E)_e$: قدرة التوقف الالكتروني.
- t : سمك العينة التي تم اختراقها.
- T(%) : النفاذية.

T_n : الطاقة المحولة من القذيفة إلى الذرة الأولية المصدومة.

U_{ZBL} : كمون كولومبي للحجب ذو نوع ZBL.

V_{TF} : كمون طوماس-فيرمي.

V_0 : سرعة بوهر .

V : سرعة الأيون.

$V(r)$: كمون التفاعل أيون-ذرة.

Y_C : شدة الطيف في هندسة الاستقناء.

Y_A : شدة الطيف في الهندسة العشوائية.

Z_1, Z_2 : الأعداد الذرية للقذيفة و الهدف على التوالي.

الملحق 3

قائمة المداخلات العلمية

الوطنية و الدولية

1. **H. Serrar, R. Labbani, C. Benazzouz**, " *Study of radiation damage induced in Si(111) targets by antimony ions implantation*", 2^{ème} journées Internationales de Physique (2^{ème} JIPC-2016), Université les Frères Mentouri Constantine1, Algérie, Décembre (2016).
2. **R. Labbani, H. Serrar, C. Benazzouz**, "*Rutherford backscattering spectroscopy study of antimony in Si(111) samples*", International Turkish congress on molecular spectroscopy (TURCMOS2013), Istanbul, Turkey, September (2013);
3. **H. Serrar, R. Labbani, C. Benazzouz** "Etude de l'activation électrique de l'Antimoine dans le Silicium", 12^{ème} Rencontre Marocaine sur la Chimie de l'Etat Solide REMCES12, Casablanca, Maroc, novembre (2012);
4. **H. Serrar, R. Labbani, C. Benazzouz** "Etude de l'activation électrique des ions d'Antimoine implanté dans le Silicium par la méthode de caractérisation RBS/C", 1st International conference on new materials and active devices, Oum El-Bouaghi, Algeria, May (2011);
5. **R. Labbani, H. Serrar, M. Mahtali, C. Benazzouz** "*Study of the Annealing and Ageing Effects on the Behaviour of Antimony Ions Implanted in Si(111) Targets*", 13th European Congress on Application of surface and Interface Analysis, Antalya, turkey, October (2009);

الملحق 4

المنشورات العلمية

المقال الأول



Experimental characterization of monocrystalline Si targets implanted with Sb^+ ions

R. Labbani*, H. Serrar, L. Baouni

Department of Physics, Faculty of Sciences-Exactes, University Mentouri of Constantine, Route de Ain El Bey, 25000 Constantine, Algeria

ARTICLE INFO

Available online 7 October 2009

Keywords:

Silicon–Si
Antimony–Sb
Ion implantation
Characterization of target
Optical measurement
X-ray diffraction

ABSTRACT

Monocrystalline silicon targets were submitted to a beam of antimony ions. The Si(111) substrates were implanted at an energy of 120 keV, at room temperature, to a dose varying from 1×10^{15} to 5×10^{15} $\text{Sb}^+ \text{cm}^{-2}$. To recover the radiation defects generated by Sb^+ ions, a thermal annealing was performed, at 900 °C for 30 min under very high vacuum. The study of antimony ion implantation in the monocrystalline silicon targets was performed by means of different experimental techniques: X-ray diffraction, optical and electrical measurements.

The perturbations enhanced by Sb^+ ion implantation and the recovery of the damage were investigated with great interest. Although the selected techniques are not frequently applied to investigate such phenomena, they have provided important results. In as-implanted specimens, it was found that the radiation damage increased with the increase of antimony dose. After the annealing treatment, a good recovery of defects was obtained especially in the samples implanted with the low dose (i.e. 1×10^{15} $\text{Sb}^+ \text{cm}^{-2}$).

© 2009 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The most used elements for the doping of semiconductors are boron for p-type and phosphorus or arsenic for n-type. Concerning the antimony, it is a donor that possesses a low diffusivity in silicon. Hence, it is suitable for the very shallow electronic junction technology (i.e. $< 0.1 \mu\text{m}$) [1–3]. The technique that is commonly employed to introduce these elements is ion implantation [4]. Indeed, the method possesses several qualities such as high precision in dose, doping over the maximum solid solubility, reduced contamination especially by oxygen, etc. However, during the implantation of the dopant, radiation damage is usually observed in the target. This effect, which is due to the collisions between the ions and the target atoms, is generally traduced by an amorphisation in the perturbation region. Hence an annealing treatment at high temperatures (~ 900 °C) is usually performed for the restoration of defects.

In general, expensive and sophisticated techniques (Rutherford backscattering spectroscopy (RBS), secondary ion mass spectroscopy (SIMS), transmission electron microscopy (TEM), etc.) are carried out for the analysis of materials submitted to ion implantation. In this work, we study the antimony ion implantation in $\langle 111 \rangle$ oriented silicon wafers using common, simple and non-destructive methods (X-ray diffraction, electrical and optical

measurements). Our goal is to apply these techniques, which are available in almost all laboratories, and to show that interesting results may be obtained from the samples.

2. Experimental

Monocrystalline Cz Si(111) oriented wafers were used as targets for antimony ion implantation. The method was performed with an energy of 120 keV, at room temperature, to a dose varying from 1×10^{15} to 5×10^{15} $\text{Sb}^+ \text{cm}^{-2}$. Afterwards, many implanted samples ($\sim 1 \text{cm} \times 1 \text{cm}$) were cut up and a thermal annealing was performed, at 900 °C for 30 min under very high vacuum (10^{-8} Torr), to recover the radiation defects generated by Sb^+ ions and to activate the dopant.

The investigation was carried out by means of X-ray diffraction (XRD), electrical and optical measurements. The analysis by XRD technique was carried out with a Siemens D8 advance diffractometer using a Cu anode at 35 kV and 20 mA. Standard θ – θ scans were performed from 10 to 100° 2θ in steps of 0.02°. Hence, the total time analysis was estimated to be approximately 60 min for each specimen. The resistivity measurements were performed in an EPS-08 Alessi apparatus. It was equipped with four aligned probes of a tungsten alloy. The distance between the different probes was fixed to 1 mm, the current, between the exterior probes, was chosen to be 0.3 mA. The voltage was obtained between the interior ones. The optical measurements were performed by means of transmission experiments in the

* Corresponding author. Tel./fax: +213 31 84 43 22.

E-mail address: reblabbani@scientist.com (R. Labbani).

visible and near-infrared range using a 3101 pc-shimadzu spectrometer.

3. Results and discussion

3.1. XRD characterization

In Fig. 1 several XRD spectra, corresponding to non-annealed samples, are presented. First of all, we take into account the reference case (i.e. non-implanted and non-annealed sample) that is displayed in Fig. 1(a). The spectrum exhibits two high-intensity Si-peaks at 28.5° and 95.08° approximately, corresponding to Si(111) and Si(333) reflections, respectively. We note that the peak intensities are in the maximum allowable range for safe operation of the detector, which reveals the good crystallographic quality of the reference specimens. After antimony ion implantation, the intensities of Si(111) and Si(333) lines decrease significantly. This decreasing phenomenon progresses with the rise of antimony dose. For instance, we report in Fig. 1(b) and (c) the XRD spectra corresponding to 1×10^{15} and 1.6×10^{15} $\text{Sb}^+ \text{cm}^{-2}$, respectively. For the specimen that is implanted with the higher dose (Fig. 1(c)), the intensity of the Si(111) line decreases further while the Si(333) line disappears completely. From that, we can conclude that the

perturbations (radiation damage) of the silicon lattice increase with increase in the antimony dose. In other words, we attribute the decrease of the intensities peaks to the amorphisation of the film.

The amorphous character of the as-implanted samples is demonstrated by the broadening of the diffraction peaks. In Fig. 2 we study the shape of (111) peaks for 1×10^{15} and 1.6×10^{15} $\text{Sb}^+ \text{cm}^{-2}$ doses. From this figure, it is clear that a broadening of the peak occurs after antimony ion implantation. Moreover, one can notice that the broadening effect increases with the increase in antimony dose.

After the annealing treatment, a good recovery of the radiation damage is obtained. For illustration, we report in Fig. 3 the case of 1×10^{15} $\text{Sb}^+ \text{cm}^{-2}$ dose. If we compare this spectrum with that in Fig. 1(a) (corresponding to the reference sample), we see that the two spectra are comparable, i.e. the shape and the intensity of the (111) and (333) peaks of the implanted and annealed sample (Fig. 3) are almost identical to those corresponding to the reference specimen (Fig. 1(a)). This reveals the restoration of the damaged silicon regions (approaching the state of reference sample) by the annealing treatment. Concerning the rest of the specimens, we noticed that the recovery of radiation damage is better for the low doses of antimony (figures not reported). This is logical since the radiation damage increased with the increase in antimony dose.

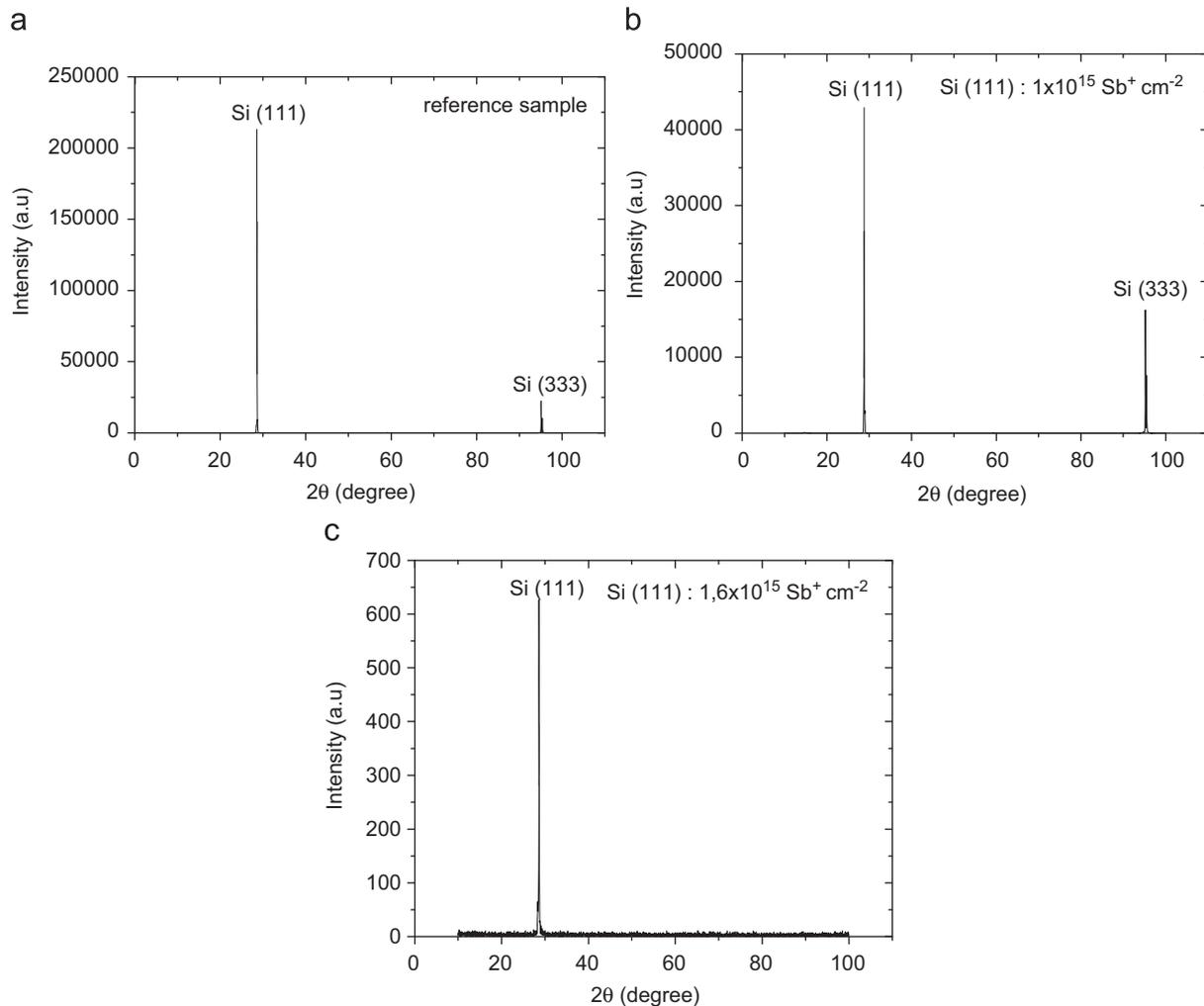


Fig. 1. XRD spectra corresponding to Si(111) specimens: (a) reference; (b) as-implanted (at 120 keV) with 1×10^{15} $\text{Sb}^+ \text{cm}^{-2}$ dose; (c) as-implanted (at 120 keV) with 1.6×10^{15} $\text{Sb}^+ \text{cm}^{-2}$ dose.

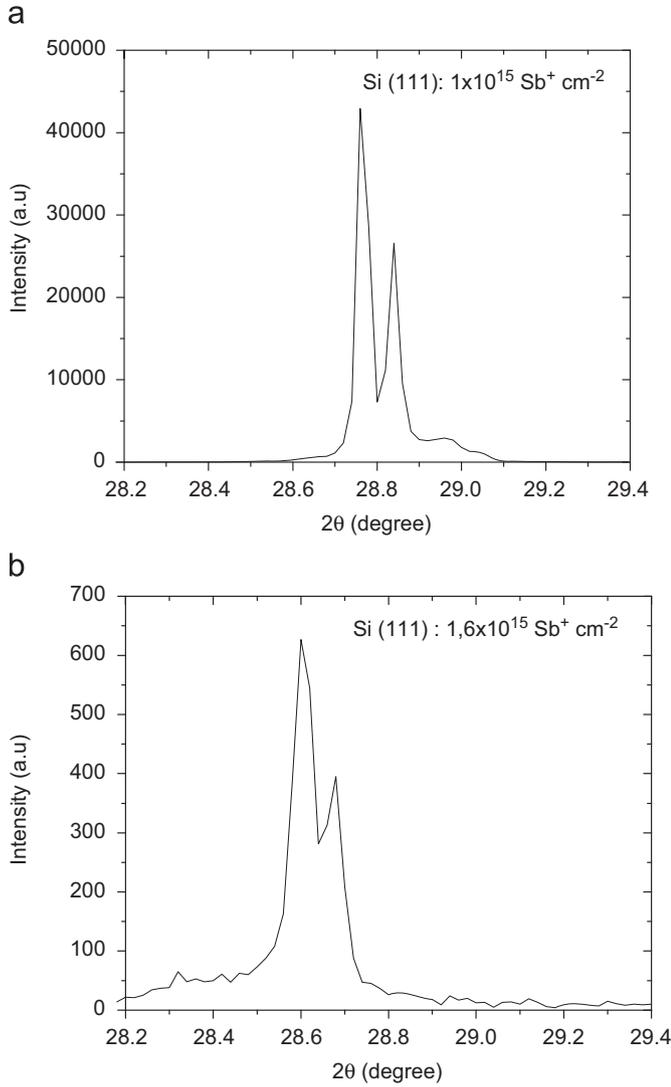


Fig. 2. XRD spectra corresponding to as-implanted (at 120 keV) Si(111) specimens: (a) $1 \times 10^{15} \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-2}$ dose and (b) $1.6 \times 10^{15} \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-2}$ dose. Only the (111) peak is displayed.

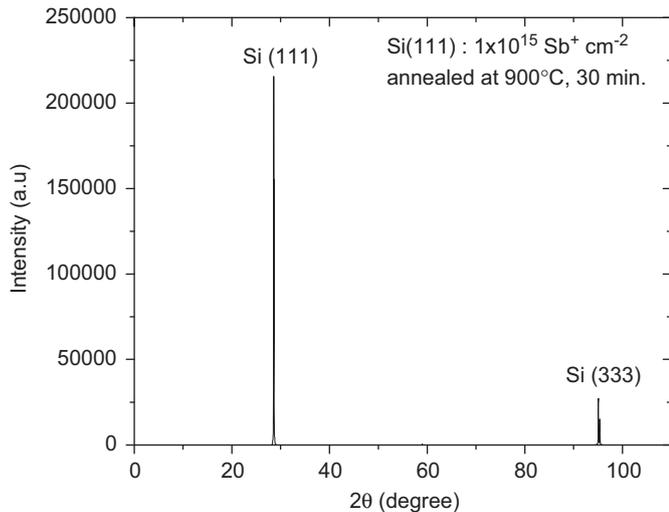


Fig. 3. XRD spectrum corresponding to Si(111) specimen implanted at 120 keV, with $1 \times 10^{15} \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-2}$ dose, and annealed at 900°C for 30 min (under vacuum: 10^{-8} torr).

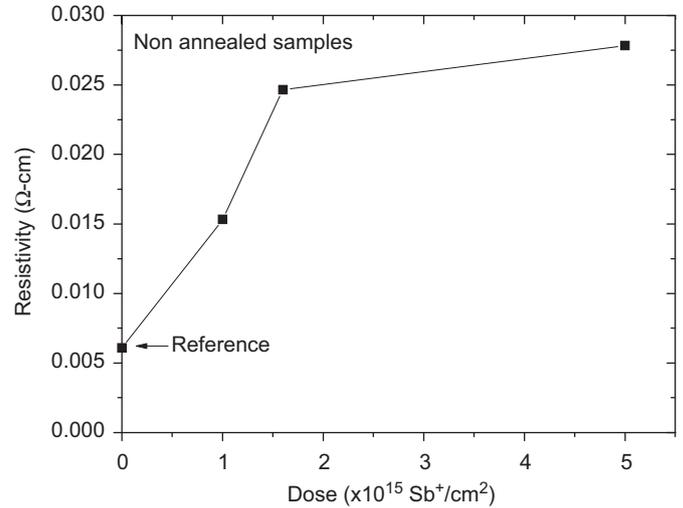


Fig. 4. Four-probe resistivity measurements obtained from as-implanted (at 120 keV) samples. The reference point is included for comparison.

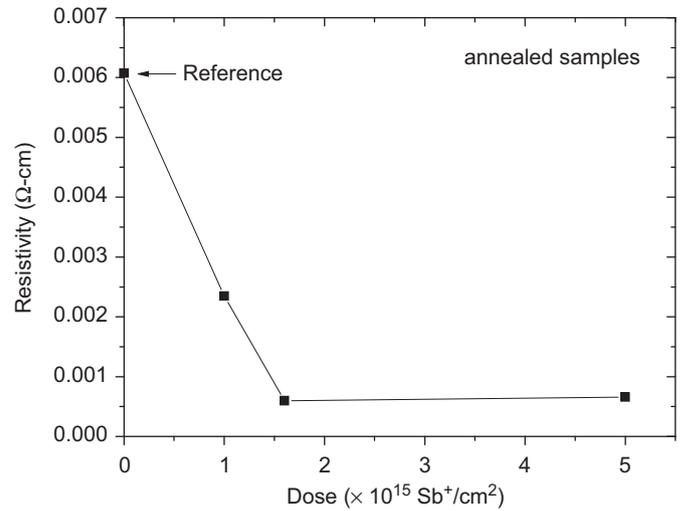


Fig. 5. Four-probe resistivity measurements obtained from samples implanted with different antimony doses and annealed at 900°C for 30 min under very high vacuum (10^{-8} Torr).

3.2. Electrical characterization

In Fig. 4, we present the values of the resistivity obtained from as-implanted samples. The first point (dose = $0 \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-2}$, $\rho \sim 0.006 \Omega \text{ cm}$) is reported to indicate the reference case. From this resistivity value, one can conclude that the Cz wafers used were not intrinsic (i.e. already doped with a specie). Besides, from Fig. 4 it is clear that the resistivity is an increasing function of the Sb dose. We note that, at this stage, the samples are un-annealed and the antimony ions are not active. Hence, we attribute the elevation of the resistivity to the amorphisation phenomenon, which increases with the elevation of antimony fluency (this has been revealed by XRD measurements). In other words, we can say that the conductivity in the reference specimen (having monocrystalline structure) is better with regard to the implanted samples (having amorphous structure).

After the annealing treatment, the resistivity measurements indicate a significant decrease with respect to that shown in Fig. 4. Indeed, in Fig. 5, we notice that all the values are lower than that related to the reference sample. We attribute this result to the

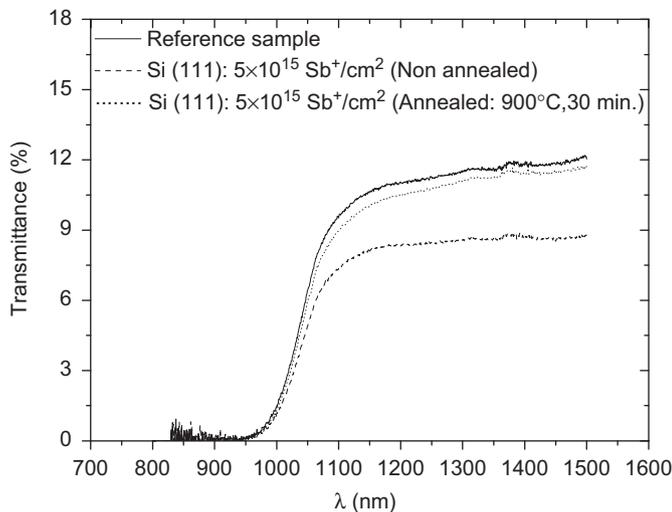


Fig. 6. vis-NIR transmission spectra obtained from Si(111) samples. (—) Virgin; (---) as-implanted with $1 \times 10^{15} \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-2}$ dose; (...) implanted with $1 \times 10^{15} \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-2}$ dose and annealed at 900°C , 30 min under vacuum (10^{-8} Torr).

restoration of the radiation damage. Furthermore, we notice that the resistivity decreases with the increase in antimony dose, which reveals the electrical activation of antimony ions.

3.3. Optical characterization

The transmittance measurements, in the visible and near-infrared range, have provided coherent and complementary results with respect to previous analysis. For instance, in Fig. 6 we report the values of the transmittance obtained from different samples. If we compare the spectrum corresponding to the reference (solid line) with that obtained from the as-implanted ($1 \times 10^{15} \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-2}$) specimen (dashed line), we show that the transmittance decreases with the introduction of the ions. This may be attributed to the amorphisation phenomenon at the surface, which reduces the transmission of light. Our assumption is justified by the fact that defects in amorphous silicon are generally characterized by an absorption in the band tail states. Hence, the decrease of the transmission in the as-implanted samples is probably due to the appearance of these states. After the annealing treatment (dotted line), the transmission is improved approaching the state of the reference. This is related to the restoration of defects at the surface of the targets.

To compute the energy (E_g) of the bandgap, we evaluated the absorption coefficient (α) using the formulas of Beer Lambert [5]. Later, we transformed the transmission spectra and obtained new plots where $(\alpha h\nu)^{0.5}$ is displayed on the y-axis and the energy ($h\nu$) is reported on the x-axis. For illustration, we report in Fig. 7 the case corresponding to the virgin specimen. From this figure, it is clear that the value of the bandgap energy is obtained in the linear part of the curve. The computation of the bandgap energies for all the samples has shown that the quantity increases with rise of antimony dose which is in agreement with literature [6,7]. We also see that, after the annealing treatment, the energies decrease and become comparable to that relative to the reference sample. We attribute that to the recovery of radiation damage by the heating of the specimens. For example, the following values were obtained: $e_g=1.11 \text{ eV}$ (for virgin sample), $e_g=1.13 \text{ eV}$

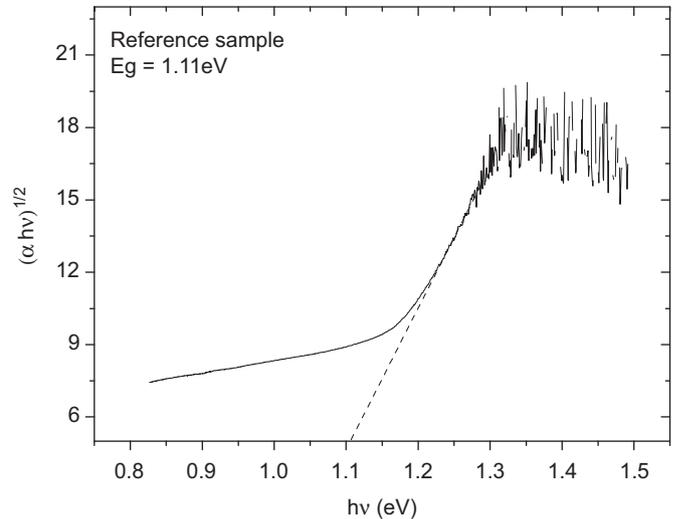


Fig. 7. Energy bandgap (E_g) of the virgin Si(111) sample determined in the linear part of the curve.

(for $5 \times 10^{15} \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-2}$ as-implanted sample) and $E_g=1.112 \text{ eV}$ (for $5 \times 10^{15} \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-2}$ implanted and annealed sample).

4. Conclusions

Antimony ion implantation in Si(111) was studied by means of different techniques. These common methods were selected to analyze the samples with regard to the different parameters: antimony dose and annealing treatment. The implantations were performed at an energy of 120 keV, with a dose varying from 1×10^{15} to $5 \times 10^{15} \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-2}$. An annealing treatment was applied, at 900°C for 30 min under very high vacuum to recover the radiation damage generated by Sb^+ ions and to activate the dopant. X-ray diffraction, optical and electrical measurements were carried out for the analysis of the different specimens. These simple and non-destructive methods were able to provide important results. It was shown that the radiation damage increased with increase in antimony dose, which is in agreement with our previous work [8]. After the annealing treatment, a good recovery (approaching the state of the reference sample) of the damage was obtained. In addition, the electrical activation of antimony ions was also revealed.

References

- [1] J.F. Ziegler (Ed.), Ion Implantation, Science and Technology, Academic Press, San Diego, 1988.
- [2] Y. Mii, S. Rishton, Y. Taur, D. Kern, T. Lii, K. Lee, K.A. Jenkins, D. Quinlan, T. Brown JR., D. Danner, F. Sewell, M. Polcari, IEEE Electron Device Lett. 15 (1994) 28.
- [3] J.D. Plumm, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. (1997) 438.
- [4] Tudor E. Jenkins, in: Semiconductor Science, Growth and Characterization Techniques, Prentice Hall International (UK) Limited, 1995, p. 85.
- [5] Charles S. Williams, Becklund Orvillea, A Short Course for Engineers and Scientists, John Wiley Sons, New York, 1972.
- [6] W. Bludau, A. Onton, W. Heinke, J. appl. phys. usa 45 (1974) 1846.
- [7] Robert Hull (Ed.), Properties of Crystalline Silicon, emis Data Revues series, No. 20, IET, 1999.
- [8] R. Labbani, R. Halimi, T. Laoui, A. Vantomme, B. Pipeleers, G. Roebben, Mater. Sci. Eng. B 102 (2003) 390.

المقال الثاني



Characterization of Silicon Surfaces Implanted with Antimony Ions and Submitted to Annealing and Ageing Treatments

R. Labbani^{1,*}, H. Serrar¹, and C. Benazzouz²

¹*Département de Physique, Faculté des Sciences Exactes, Université Mentouri de Constantine, Route de Aïn El Bey, 25000 Constantine, Algérie*

²*Centre de Recherche Nucléaire d'Alger, 2 Bd Frantz Fanon, 16000 Alger, Algérie*

In this work, we study the effect of annealing and ageing treatments on the behavior of antimony atoms implanted in Si(111) targets. The ion implantation was performed at 120 keV energy to a dose of $2.3 \times 10^{15} \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-2}$. Concerning the annealing treatment, it has been carried out at 900 °C during 30 minutes (under vacuum). The samples have been analyzed in two steps: immediately after their elaboration and after an ageing period of 4 years and 4 months. Several techniques have been applied for samples analysis: Rutherford backscattering spectroscopy (RBS), X-ray diffraction (XRD) and electrical measurements. Before the ageing period, a good recovery of radiation damage has been obtained and ~50% of the dopant was redistributed into substitutional silicon sites. However, ~22% of antimony has been lost from the Si substrates. After the ageing period, the fraction of substituted atoms remained unchanged but a quantity of ~20% has again been lost from the specimens. This quantity provided from antimony atoms which remained into irregular positions of Si lattice.

Keywords: Ion Implantation, Antimony, Silicon.

RESEARCH ARTICLE

1. INTRODUCTION

Ion implantation is a powerful method used, particularly, for the technology of semiconductor devices. It is attractive because of its numerous advantages such as: accurate knowledge of the ions concentration/depth; abrupt doping profiles; etc.^{1,2} In the past, for silicon *n*-type doping, phosphorus and arsenic were the most used elements. Concerning antimony, it presented an unwanted phenomenon which was its remarkable exo-diffusion,³ from the Si wafers, during annealing treatments at high temperatures (≥ 900 °C). Actually, the researchers are motivated to find optimized conditions in order to integrate this element for Si doping. Their motivation is justified by the fact that antimony is a good candidate for the fabrication of very shallow junctions (i.e., $\leq 0.1 \mu\text{m}$).^{3,4} Indeed, it is an element possessing a low diffusivity in silicon. Interesting results are reported in literature. For instance, if one uses an Sb-B co-implantation^{5,6} or Si(100) targets,⁷ the Sb^+ exo-diffusion is limited. Moreover, in recent years, an increasing level of research interest has concentrated on

the use of Sb implants in tensile strained silicon because they demonstrate high electrical activation and nanometer range profiles.^{8,9}

In general, the analysis of samples is carried out immediately after their elaboration. However, we assume that the study of the same samples may give different results if the specimens are aged along some years. Taking into account that ion implantation is used for very shallow electronic junction technology, it is important to study the ageing effect on the samples. Indeed, it is crucial to know if the device keeps its characteristics along a large period (i.e., some years). In this work, we study antimony ion implantation into monocrystalline silicon targets after an ageing of 4 years and 4 months. Obviously, a comparison will be made between the results obtained just after the samples preparation and those provided after the ageing period.

2. EXPERIMENTAL DETAILS

Monocrystalline Cz Si(111) wafers were implanted with antimony ions at room temperature. The energy and dose were fixed to 120 keV and $2.3 \times 10^{15} \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-2}$

* Author to whom correspondence should be addressed.

respectively. Afterwards, many implanted samples ($\sim 1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$) were cut up. Then, to recover the radiation defects generated by Sb^+ ions and to activate the dopant, a thermal annealing was performed at $900 \text{ }^\circ\text{C}$, 30 minutes under very high vacuum (10^{-8} Torr).

The specimens were divided into two parts. The part 1 (P_1) was analyzed by RBS technique in random and channeling modes, directly after the specimens preparation (i.e., the samples implantation, then annealing treatment). Afterwards, the samples P_1 were aged for a period of 4 years and 4 months. These aged specimens were consequently called samples P_2 . For these last specimens, the RBS, the XRD and the electrical measurements were applied. In this paper, we will display the figures related to samples (P_2) only. Obviously, all the results will be discussed with respect to samples (P_1) analysis.

The analysis by XRD was performed in a Siemens D8 Advance diffractometer using a Cu anode at 35 kV and 20 mA. Standard θ - θ scans were used from 10 to $100^\circ 2\theta$ in steps of 0.02° . We note that the total time analysis was estimated to approximately 60 minutes for each specimen. The resistivity measurements were performed in EPS-08 Alessi apparatus which was equipped with four aligned probes of a tungsten alloy. The distance between the different probes was fixed to 1 mm. The current, between the exterior probes, was chosen to be 0.3 mA. Concerning the voltage, it was obtained between the interior ones. The precision for determination of resistivity values was less than 1% relative. For the RBS analysis, it was carried out in random and channeling modes. We used a beam of He^+ particles at 2 MeV energy and a current of 100 nA. During the experience, the He^+ ions backscattered at 165° with respect to the incident direction. The backscattered ions were detected with a surface barrier solid state detector FWHM $\sim 20 \text{ keV}$. The random RBS spectra were simulated using the software RUMP.¹⁰ The precision of this technique for determination of number of atoms was 1% relative.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. XRD Characterization

In Figure 1, several XRD spectra are reported. The XRD spectrum corresponding to reference sample (i.e., non implanted, non annealed and aged sample) is displayed in Figure 1(a). It is clear that two high intensity Si-peaks are present at 28.5° and 95.08° approximately. The two peaks, corresponding to Si(111) and Si(333) reflections respectively, are in the maximum allowable range for safe operation of the detector which reveals the good crystallographic quality of the reference specimens. After, antimony ion implantation in the Si(111) targets, an important radiation damage is observed. This effect is revealed by the significant decrease of Si(111) and Si(333) intensities (Fig. 1(b)). From that, we conclude that the introduction of

antimony ions enhances significant perturbations (radiation damage) in the silicon lattice which is in agreement with literature.^{1,2} Moreover, from Figure 1(c), where only the (111) peak is showed, it is clear that an important broadening of this diffraction peak is obtained. This fact, confirms the presence of radiation damage in the as implanted sample. Besides, if we take into account the principal peak (i.e., the (111) reflection), we found that it is located at $2\theta \sim 28.58^\circ$ in the case of reference sample (Fig. 1(a)). After the antimony implantation, this reflection is divided into two small peaks which are located at $2\theta \sim 28.76^\circ$ and $2\theta \sim 28.84^\circ$, (Fig. 1(c)). In other words, the (111) reflection is shifted towards the higher 2θ value, in relation to reference case, showing that antimony ions induce a tensile stress in the silicon lattice.

After the annealing treatment, a good restoration of the damaged silicon regions (approaching the state of reference sample) is obtained. Indeed, if we compare the spectrum of Figure 1(d) (corresponding to an implanted and annealed sample) with the spectrum of Figure 1(a) (corresponding to reference sample), we remark that the two spectra are comparable in term of intensity. The recovery of radiation damage is also revealed by the (111) reflection (Fig. 1(d)). Indeed, it is located at $2\theta \sim 28.53^\circ$ which corresponds to the position of the reference peak.

3.2. Electrical Characterization

On Figure 2, we report the values of the four probe resistivity measurements obtained from different aged samples. The point 1, related to the reference case (non implanted and non annealed), corresponds to a resistivity of $\sim 0.00360 \text{ } \Omega \text{ cm}$. From this value, one can conclude that the used Cz wafers were not intrinsic (i.e., already doped with species). Concerning the point 2, it is related to an as implanted sample. It exhibits a higher value with respect to the reference (point 1) which is attributed to the non activation of antimony ions and to the radiation damage. This has been revealed by XRD measurements (see Figs. 1 (b and c)). After the annealing treatment, the resistivity measurements (point 3) indicate a significant decrease with respect to point 2. We notice that the value is lower than that related to the reference sample (point 1) what can be attributed to the restoration of the radiation damage and to the electrical activation of antimony atoms after annealing of the sample.

3.3. RBS Characterization

In Figure 3(a), several RBS spectra are reported for the case of aged Si(111) samples. The spectrum in dotted line (Fig. 3(a)) corresponds to the reference specimen in channeling mode, whereas the second (solid line) and the third (dashed line) are related to as implanted sample in channeling and random modes respectively. It is clear that the reference spectrum exhibits a very small yield which

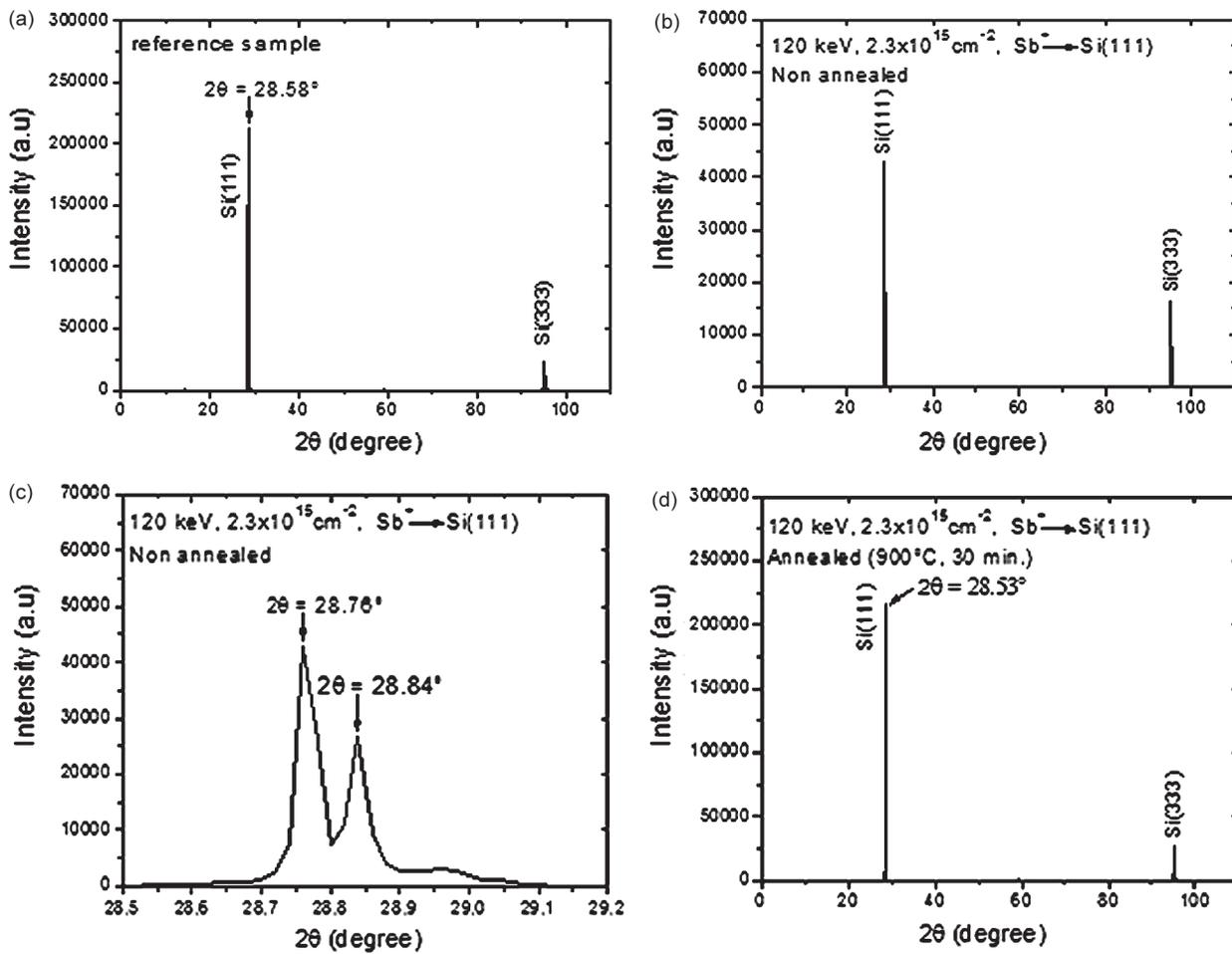


Fig. 1. XRD spectra corresponding to different aged Si(111) specimens: (a) reference (i.e., non implanted and non annealed); (b) as implanted; (c) extension of the region corresponding to (111) reflection of Figure 1(b); implanted and annealed under vacuum (10^{-8} Torr).

reveals the good crystallographic state of the used wafers. After the antimony ion implantation, a significant damage is enhanced in the silicon substrates. Indeed, the yield of the channeling spectrum (solid line) is very high with respect to that corresponding to the reference spectrum

(dotted line). Besides, if we take into account the surface peak, we note that it does not reach the level of the random spectrum (dashed line). From that we conclude that antimony ions introduce significant radiation damage in Si targets but not an amorphisation. We note that this effect is in agreement with XRD results.

After the annealing treatment, a good recovery of the radiation damage is obtained. This is revealed by the channeling spectrum (solid line) of Figure 3(b) which becomes comparable to the reference spectrum (dotted line). This restoration has also been obtained by XRD measurements.

To understand the behavior of the antimony atoms, we will study the antimony RBS peaks only. First of all, in Table I, we report the results (obtained by using the RUMP program simulation) concerning the number of atoms, the projected range (R_p) and the standard deviation (ΔR_p) for P_1 and P_2 samples. Concerning the projected range (R_p) and the standard deviation (ΔR_p), no ageing effect has been noticed because the values are the same for both P_1 and P_2 samples. Besides, we note that these values are in agreement with R_p and ΔR_p of 603 and 168 Å

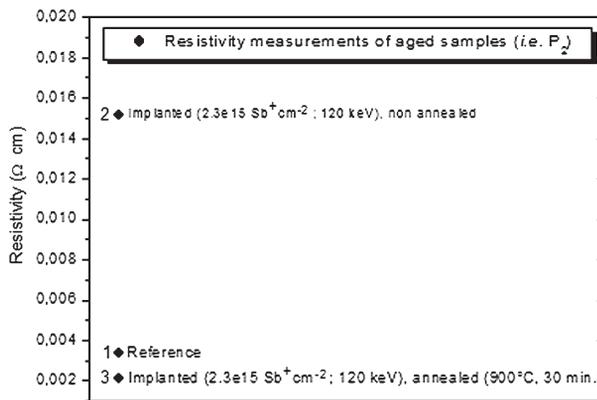


Fig. 2. Four probes resistivity measurements obtained from different aged Si(111) samples.

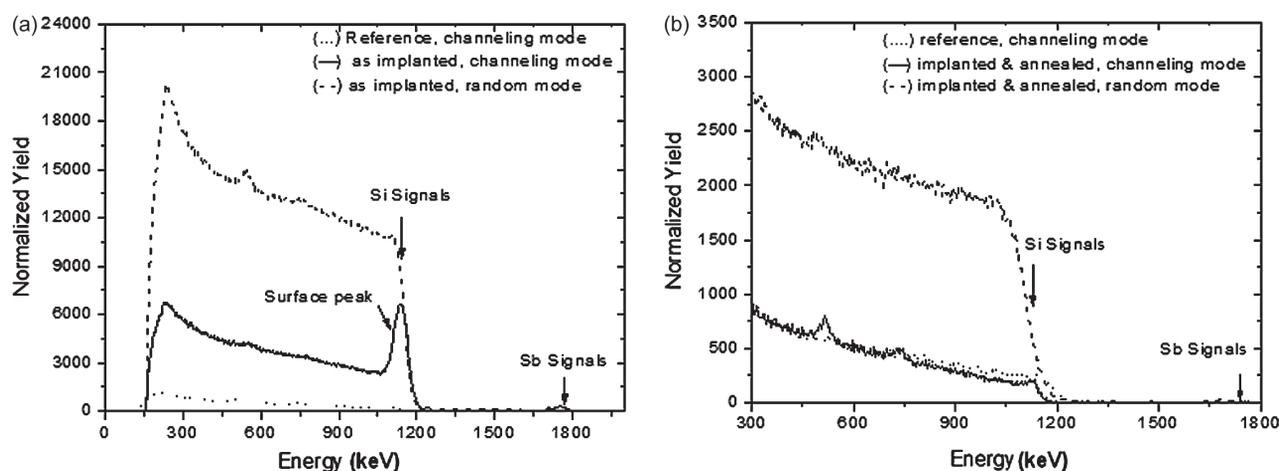


Fig. 3. RBS spectra of 2 MeV He ions scattered on different aged Si(111) specimens: (a) before annealing; (b) after annealing. Preparation conditions: dose = 2.3×10^{15} Sb⁺ cm⁻²; energy = 120 keV; vacuum annealing (900 °C, 30 min, 10^{-8} Torr).

Table I. Values of the number of atoms, the projected range (R_p) and the standard deviation (ΔR_p) obtained by simulation (using the program RUMP) of RBS spectra corresponding to samples P_1 (i.e., non aged) and P_2 (i.e., aged).

	Sample P_1 (i.e., non aged) as implanted	Sample P_1 (i.e., non aged) implanted and annealed	Sample P_2 (i.e., aged) as implanted	Sample P_2 (i.e., aged) implanted and annealed
Projected range, R_p (Å)	570	570	570	570
Standard deviation, ΔR_p (Å)	170	170	170	170
Number of atoms ($\times 10^{15}$ Sb cm ⁻²)	2.28	1.75	2.28	1.39

respectively, found by the program SRIM2000¹¹ in our previous work.¹²

Concerning the number of atoms, for as implanted samples, this quantity is found to be $\sim 2.28 \times 10^{15}$ Sb cm⁻² for non aged and aged samples which signifies that no loss of antimony has occurred after the ageing period. Moreover, we note that this experimental value is in agreement with the nominal value (i.e., 2.3×10^{15} Sb cm⁻²).

However, the situation was different for the annealed specimens. For samples P_1 , it has been noticed (in our previous RBS measurements) that approximately $22\% \pm 1\%$ of antimony atoms has been lost from the specimens and approximately $50\% \pm 1\%$ (i.e., $(1.17 \pm 0.01) \times 10^{15}$ Sb cm⁻²) of this dopant was found to be incorporated into silicon substitutional sites or shadowed by Si atoms. We note that the loss of antimony has been reported in our previous work under different conditions.¹² For samples P_2 , approximately $(1.39 \pm 0.01) \times 10^{15}$ Sb cm⁻² (see Table I) of antimony is found to be in the aged specimens. This signifies that $\sim 20\% \pm 1\%$ of the remaining dose (in the annealed P_1 samples) has been lost from the samples after the ageing period. In Figure 4, we report the RBS spectra corresponding to annealed and aged samples in random (solid line) and channeling (dotted line) modes.

From the comparison of the areas of the peaks, it is clear that approximately $(67 \pm 1)\%$ (i.e., $(1.17 \pm 0.01) \times 10^{15}$ Sb cm⁻²) of antimony is located into substitutional

silicon sites or shadowed. From that, we notice that the quantity of antimony ions which was redistributed into substitutional silicon sites in P_1 samples remains constant after the ageing period. Hence, we conclude that the loss of antimony after the ageing period resulted from the fraction which was located into irregular sites of Si lattice.

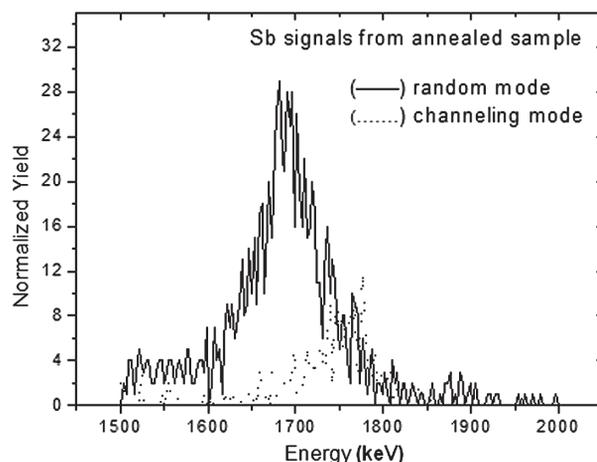


Fig. 4. RBS spectra of 2 MeV ions scattered on one implanted (2.3×10^{15} Sb⁺ cm⁻², 120 keV), under vacuum annealed (900 °C, 30 min, 10^{-8} Torr) and aged Si(111) specimen. Selected energy region corresponds to the Sb peak from Figure 3(b).

4. CONCLUSION

In this work, we have studied the effects of annealing and ageing on the behavior of antimony atoms implanted in Si(111) targets. The samples were implanted by antimony ions ($2.3 \times 10^{15} \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-2}$, 120 keV), and then a thermal annealing (900 °C, 30 minutes) was applied for antimony activation and radiation damage recovery.

The specimens were divided into two parts. The part 1 (P_1) was analyzed directly after the specimens preparation. Afterwards, the samples P_1 were aged for a period of 4 years and 4 months. These aged specimens were consequently called samples P_2 .

Before ageing, for as implanted samples, the antimony atoms were randomly localized in the surface of silicon targets. After the ageing period, no loss of the antimony has been noticed. For the samples P_1 , which were annealed, a good recovery of radiation damage has been obtained and $\sim 50\%$ of the dopant was redistributed into substitutional silicon sites. However, $\sim 22\%$ of antimony has been lost from the Si substrates.

Concerning the annealed and aged specimens, a quantity ($\sim 20\%$) of antimony has also been lost from the specimens. This behavior was not annoying because it affected antimony atoms which remained into irregular positions

of Si lattice and not those which have been electrically activated (i.e., substituted in the Si lattice).

References and Notes

1. T. E. Jenkins, *Semiconductor Science-Growth and Characterization Techniques*, Prentice Hall International Limited, UK (1995).
2. J. F. Ziegler, *Ion Implantation Technology*, Elsevier Science Publishers, B. V. North-Holland (1992).
3. J. F. Ziegler, *Ion Implantation, Science and Technology*, Academic Press, San Diego (1988).
4. J. D. Plumm, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 438 (1997).
5. C. Revenant-Brizard, J. R. Regnard, S. Solmi, A. Armigliato, S. Valmorri, C. Cellin, and F. Romanato, *J. Appl. Phys.* 79, 12 (1996).
6. S. Solmi, *J. Appl. Phys.* 83, 3 (1998).
7. R. Labbani and R. Halimi, *Mater. Sci. Eng. B* 124–25, 280 (2005).
8. N. S. Bennett, H. H. Radamson, C. S. Beer, A. J. Smith, R. M. Gwilliam, N. E. B. Cowern, and B. J. Sealy, *Thin Solid Films* 517, 331 (2008).
9. K. Horan, A. Lankinen, L. O'Reilly, N. S. Bennett, P. J. McNally, B. J. Sealy, N. E. B. Cowern, and T. O. Tuomi, *Mater. Sci. Eng. B* 154–155, 118 (2008).
10. L. R. Doolittle, *Nucl. Instr. Meth. B* 9, 344 (1985).
11. J. P. Biersack and L. G. Haggmark, *Nucl. Instrum. Meth.* 174, 257 (1980).
12. R. Labbani, R. Halimi, T. Laoui, A. Vantomme, B. Pipeleers, and G. Roebben, *Mater. Sci. Eng. B* 102, 390 (2003).

Received: 3 October 2010. Accepted: 3 January 2011.

Delivered by Publishing Technology to: York University
IP: 130.63.180.147 On: Sun, 06 Jul 2014 00:15:45
Copyright: American Scientific Publishers

المقال الثالث

Experimental Characterization of Antimony Dopant in Silicon Substrate

H. SERRAR^a, R. LABBANI^{a,*} AND C. BENZAOUZ^b

^aLaboratoire de Physique Mathématique et Subatomique, Département de Physique, Faculté des Sciences Exactes, Université Mentouri de Constantine, Route de Ain El Bey, 25000 Constantine, Algeria

^bCentre de Développement des Techniques Nucléaires, 2 Bd Frantz Fanon, BP 399, Alger Gare, Algeria

Ion implantation is a method largely used to fabricate shallow junctions in the surface target. However, the ions are randomly redistributed and a huge damage is generated in the sample. Annealing treatments are thus necessary to restore defects and to activate the dopant. Among several elements, antimony is particularly attractive since it has low diffusivity in silicon which means that is suitable to obtain ultra shallow junctions. Moreover, antimony is attractive in many applications such as the fabrication of transistors and infrared detectors. In this work, the electrical activation of antimony is studied in case of silicon target.

DOI: [10.12693/APhysPolA.129.51](https://doi.org/10.12693/APhysPolA.129.51)

PACS/topics: 61.72.U-, 68.55.Ln, 85.40.Ry

1. Introduction

Ion implantation is a doping method widely employed in semiconductor technology for the fabrication of several bipolar devices in silicon substrates particularly. This technique enables to inject a controllable quantity of any element into the near-surface region of any substrate with a good accuracy [1]. Antimony is a dopant suitable for the fabrication of *n*-type ultrashallow junctions (i.e. thickness < 0.1 μm). This is due to its high mass and low diffusivity in silicon [2–4]. However, it is reported that antimony atoms are generally out-diffused from silicon substrates at high temperature annealing [5, 6]. The phenomenon of out-diffusion which is obviously accompanied by a loss in dopant dose, has been noticed for both <100> and <111> oriented silicon substrates. In another study, it was found that the maximum electrical activity and considerable decrease in the concentration of defects were achieved at a temperature around 620 °C [7].

In this work, the Rutherford backscattering spectroscopy (RBS) technique was mainly carried out to study the behaviour of antimony atoms implanted in silicon targets. Moreover, the method has been employed to investigate the re-growth of silicon damaged layers which were generated by antimony implantation. By using RBS in channelling mode, we were able to compute the quantity of antimony atoms which were redistributed, in substitutional silicon lattice, by annealing treatment. This quantity is called F_s and it is computed via the formula (1) [8, 9]:

$$F_s = \frac{1 - \chi_{\min}^{\text{Sb}}}{1 - \chi_{\min}^{\text{Si}}}, \quad (1)$$

where χ_{\min}^{Sb} — minimum yield for impurity (Sb), χ_{\min}^{Si} — minimum yield for crystal (Si).

To study and simulate RBS data, we have used the RBX code [10] which is a program allowing us to compute ion implantation parameters (projected range R_p , standard deviation ΔR_p , etc.). The code was particularly interesting since it was able to simulate RBS spectra in channelling mode and to obtain the profile of defects which were generated by ion implantation in the target. For comparison reason, the stopping and range of ions in matter (SRIM) software [11, 12] has also been used to estimate the ion implantation parameters. Finally, electrical measurements have been carried out to study the electrical behaviour of antimony atoms in the silicon substrates.

2. Experimental

In this work, Si (111) substrates were implanted with Sb⁺ ions, at room temperature, with energy of 120 keV at different doses (Table I). Afterwards, annealing treatment was performed at 900 °C during 30 min under vacuum ($P = 10^{-6}$ Torr).

TABLE I

Illustration of experimental conditions performed for each sample.

Samples	Dose [10^{15} Sb ⁺ /cm ²]	Thermal annealing
virgin	0	/
S1	1	annealed
S2	1	non-annealed
S3	1.6	non-annealed
S4	1.6	annealed

The analysing of samples was performed by RBS technique, using a Van de Graaf accelerator producing He⁺ particles with energy of 2 MeV. The technique was carried out in random and channelling modes. For channelling measurements, He⁺ beam was parallel to the crystallographic axis of Si(111) sample. Concerning the angular scan, it was performed in an interval of $\pm 1^\circ$.

*corresponding author; e-mail: labbanire@gmail.com

The electrical analysis was based on resistivity measurements. It was carried out in an apparatus of "EPS-08 Alessi" type. This device was equipped with four points (of tungsten alloy) which were aligned and equidistant ($S = 1$ mm). The current used between the outer probes was 0.3 mA.

3. Results and discussion

In Fig. 1, we display RBS spectra (antimony signals only) in random mode for S1–S4 samples. It is clear that the signals (corresponding to non-annealed samples) possess areas significantly greater than that related to annealed specimens. This means that a huge loss of antimony has occurred by exo-diffusion, from silicon substrates, after annealing treatment. This phe-

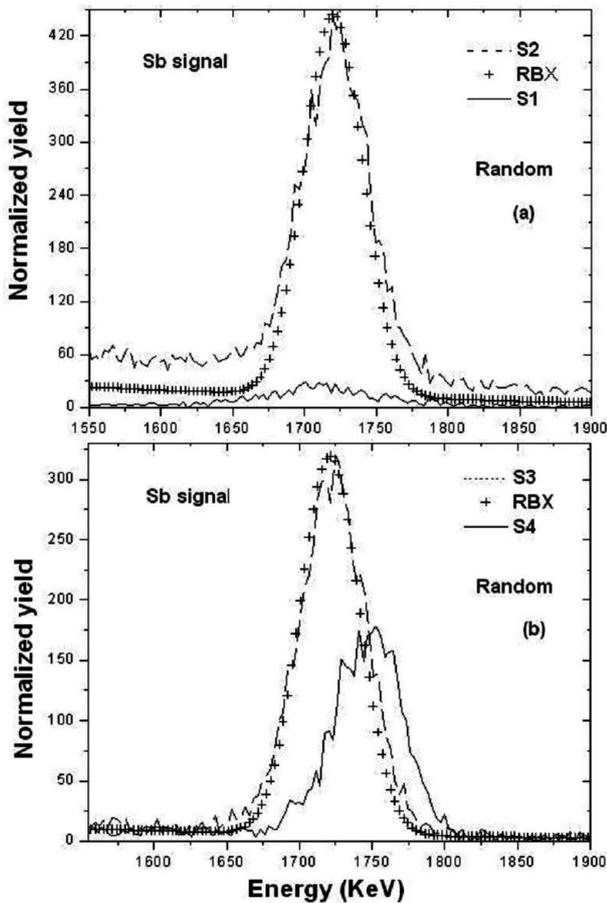


Fig. 1. RBS spectra for annealed (S1, S4) and non-annealed (S2, S3) samples in random mode. Only antimony signals are displayed.

nomenon is in agreement with our previous work which was performed in other conditions but with the same species (i.e. antimony) [6, 13]. Using RBX code, the simulation of antimony signal of sample S2 has shown that the maximum of antimony concentration was situated at 613 \AA below the surface compared with the projected range (R_p) of 641 \AA (found by SRIM program).

We also found a dose of $0.85 \times 10^{15} \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-2}$ compared with the nominal dose of $1 \times 10^{15} \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-2}$ and a concentration of $7.59 \times 10^{19} \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-3}$ which is superior with respect to maximum solid solubility of Sb in silicon (i.e. $7 \times 10^{19} \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-3}$) reported in literature [14, 15]. For Fig. 1b similar results have been obtained. The experimental dose of Sb atoms was approximately equal to $1.18 \times 10^{15} \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-2}$ and the concentration was $\approx 1.24 \times 10^{20} \text{ Sb}^+ \text{ cm}^{-3}$ which was higher than the reported maximum solid solubility of Sb in Si. For the projected range, we obtained a value of 583 \AA that was in good agreement with that provided by SRIM code.

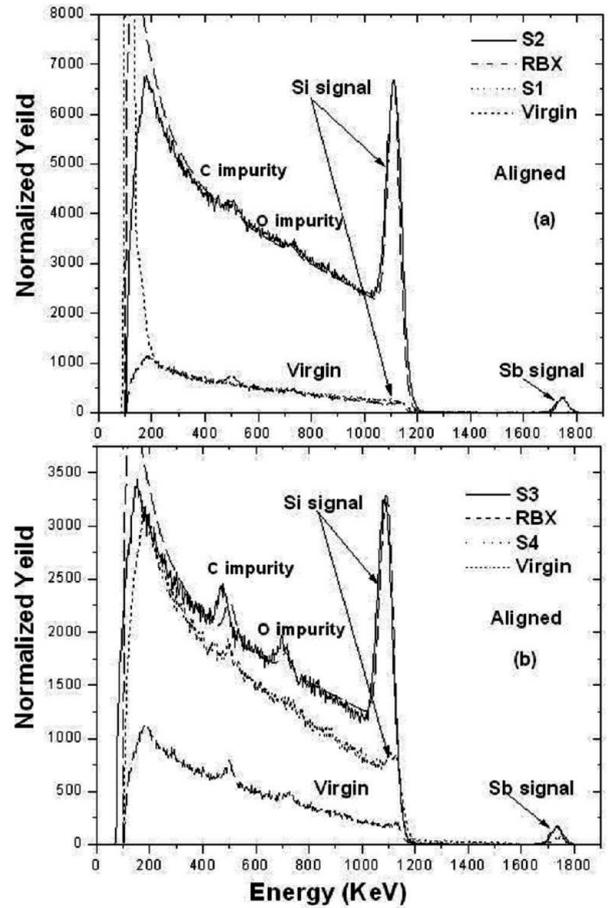


Fig. 2. RBS spectra for annealed (S1, S4) and non-annealed (S2, S3) samples in channeling mode.

In Fig. 2a and b the analysis by RBS in channelling mode of as-implanted samples (S2, S3) exhibited very high surface peaks (with respect to virgin sample (\dots)). This is related to significant radiation damage generated by ion implantation in the targets. After the annealing treatment, a good recovery of radiation damage has been obtained. This is revealed by the channelling spectrum of Fig. 2a (\dots) which became comparable to that related to virgin sample (i.e. reference spectrum). Concerning the case of Fig. 2b, corresponding to the higher

dose, the restoration of radiation damage was not completed. Indeed, the surface peak of annealed sample really decreased but was not superposed with the channelling spectrum of virgin specimen. The simulation of aligned spectra (by RBX code) has been performed for all samples. For illustration, in Fig. 2a and b the simulated spectra are displayed for non-annealed samples. According to these simulated spectra (which are well superposed with the experimental) one can conclude the accuracy of the program.

The restoration of radiation damage is better revealed by the defects profiles which were deduced by RBX code from Fig. 2. Indeed, in Fig. 3, the obtained profiles for non-annealed samples (S2, S3) exhibited significantly higher concentrations than those related to annealed specimens (S1, S4).

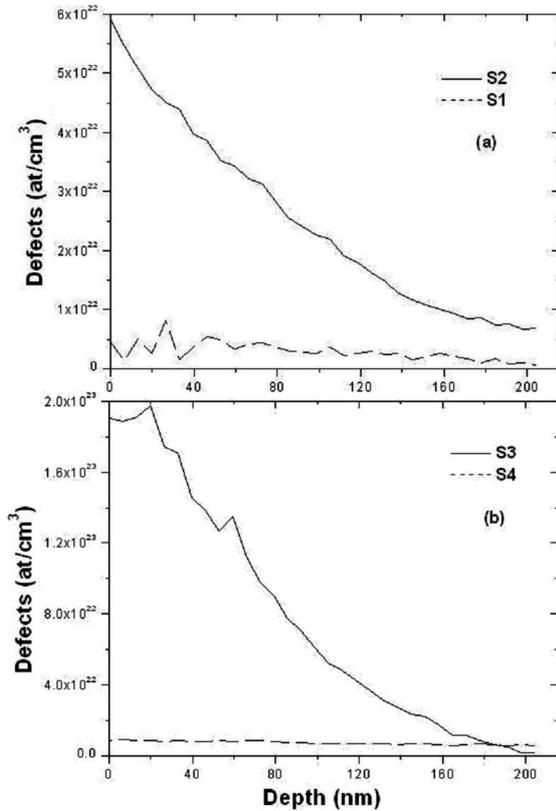


Fig. 3. Defects profiles deduced by RBX code from channeling RBS spectra of Fig. 2.

To study the redistribution of antimony atoms in Si(111) substrates, we have used the channeling wells obtained by RBS, in channeling mode, following $\langle 111 \rangle$ main axis (Fig. 4). For as-implanted samples (S2, S3), the angular distribution was almost linear which means that antimony atoms were randomly localized in the target. After the annealing treatment, the wells formation became deeper and more narrowed which is attributed to the migration of antimony atoms to substitutional positions in silicon target.

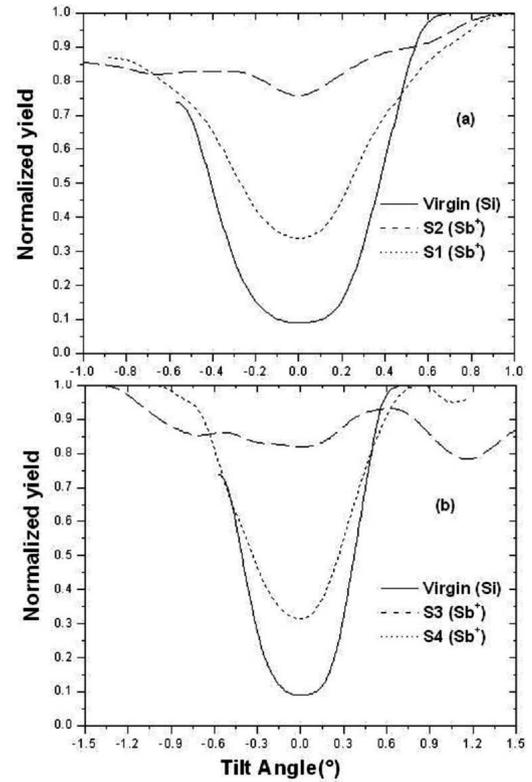


Fig. 4. Channeling angular distribution for Si and Sb around $\langle 111 \rangle$ axis for annealed (S1, S4) and non-annealed (S2, S3) samples.

To study the electrical activation of antimony atoms in the targets, we plot in Fig. 5 the resistivity of samples with respect to the quantity F_s computed via formula (1). The resistivity was found to be inversely proportional to F_s which is logical since the resistivity is known to be inversely proportional to the number of active carriers. According to Fig. 5, one can also conclude that the majority of Sb atoms have been redistributed to substitutional positions in Si targets where they became electrically active. This result is in agreement with literature [16].

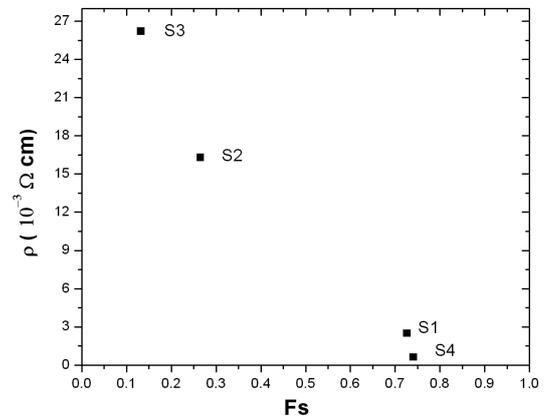


Fig. 5. Resistivity of the different samples with respect to F_s parameter.

In Fig. 6, we display the variations of resistivity as a function of each specimen. The resistivity obtained from the virgin is approximately equal to $6.456 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}$. This low value indicates that the material was not very resistive which was due to the intrinsic properties of the used semiconductor material. After ion implantation of Sb^+ ions in Si(111) targets (Fig. 6a), the resistivity jumped until $16.284 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}$ and $26.21 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}$ for S2 and S3 samples respectively. This was probably due to the amorphisation of samples, by Sb^+ ions implantation, which was more significant for the high dose. After the annealing treatment (Fig. 6b), the resistivity decreased significantly and achieved $\approx 2.497 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}$ and $\approx 0.637 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}$ for S1 and S4 samples respectively. The decrease is logically attributed to the electrical activation of antimony dopant by heat treatment [17] which is a satisfactory result.

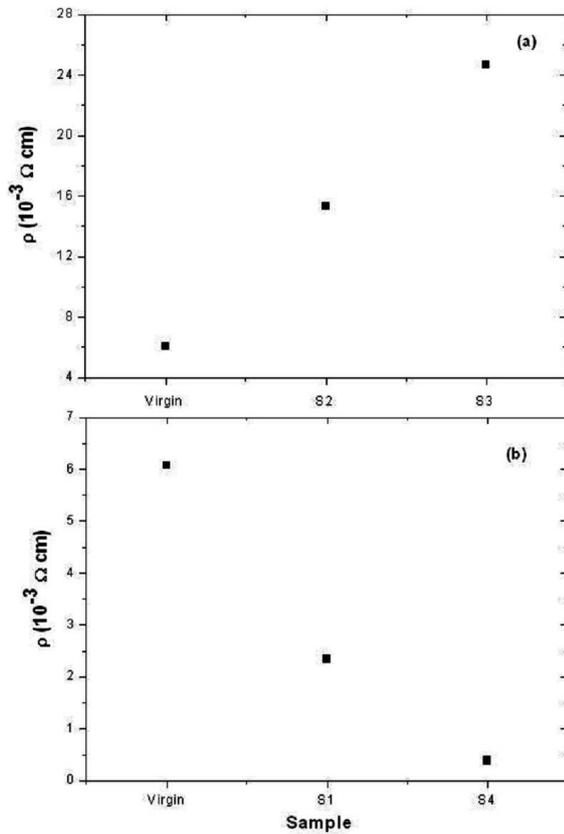


Fig. 6. Variations of resistivity with respect to different samples.

4. Conclusion

In the present paper, we have studied the behavior of antimony atoms implanted in silicon targets. The combination of electrical measurements and the Rutherford backscattering analysis has allowed important information concerning the position and the electrical activation of the dopant. The main results of our study were in agreement with literature and can be summarized as follows.

- In non annealed samples, no electrical activation has been noticed.
- The antimony migration to substitutional silicon lattice was observed for annealed specimens only.
- The fraction of substituted antimony atoms (F_s) was computed with a good accuracy.
- The fraction F_s increased while the resistivity of samples decreased.

Acknowledgments

The authors would like to thank Professor Endre Kotai, from Nuclear Physics Laboratory in KFKI institute (Budapest), for providing the RBX code.

References

- [1] H. Herman, J.K. Hirvonen, *Treatise on Materials Science and Technology, Ion Implantation*, Academic Press, New York 1980.
- [2] G.A. Sai-Halasz, H.B. Harrison, *IEEE Electr. Dev. Lett.* **7**, 534 (1986).
- [3] E. Murakami, K. Harada, D. Hisamoto, S. Kimura, in: *Electron Devices Meeting, IEDM '96, International*, IEEE, San Francisco 1996, p. 439.
- [4] K. Shibahara, K. Egusa, K. Kamesaki, H. Furomoto, *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, 2194 (2000).
- [5] C. Revenant-Brizard, J.R. Regnard, S. Solmi, A. Armigliato, S. Valmorri, C. Cellini, F. Romanato, *J. Appl. Phys.* **79**, 12 (1996).
- [6] R. Labbani, R. Halimi, *Mater. Sci. Eng. B* **124–125**, 208 (2005).
- [7] C. Benazzouz, N. Boussaa, S. Behli, M. Zilabdi, S. Tobbach, M. Derdour, *Alg. Rev. Nucl. Sci.* **2**, 119 (1997).
- [8] J.A. Borders, J.M. Poate, *Phys. Rev. B* **13**, 969 (1976).
- [9] W.K. Chu, J.W. Mayer, M.A. Nicolet, *Backscattering Spectroscopy*, Academic Press, New York 1978.
- [10] E. Kotai, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **85**, 588 (1994).
- [11] J.P. Biersack, L.G. Hagmark, *Nucl. Instrum. Methods* **174**, 257 (1980).
- [12] J.F. Ziegler, *The Stopping and Range of Ions in Matter/TRansport of Ions in Matter, SRIM/TRIM Code*, www.srim.org.
- [13] R. Labbani, R. Halimi, T. Laoui, A. Vantomme, B. Pipeleers, G. Roebben, *Mater. Sci. Eng. B* **102**, 390 (2003).
- [14] J. Narayan, O.W. Holland, *Physica Status Solidi A* **73**, 225 (1982).
- [15] A. Sato, K. Suzuki, H. Horie, T. Sugii, in: *Proc. IEEE Int. Conf. Microelectron. Test Struct.*, IEEE, Nara 1995, p. 259.
- [16] J.F. Letcher, J. Narayan, O.W. Holland, *Inst. Phys. Conf. Ser.* **60**, 265 (1981).
- [17] J.S. Williams, *Nucl. Instrum. Methods* **209/210**, 219 (1983).

Optimization of antimony or arsenic ion implantation in silicon

Abstract :

In this work, several parameters related to the ion implantation of antimony or arsenic, in silicon substrates have been studied. This study was realized experimentally and by simulation using suitable programs.

Theoretically, we have used SRIM and C-TRIM programs to simulate and predict the physical phenomena resulting from ion collisions with target atoms. We have also obtained the different distributions (vacancies, ions,...) in depth of the target and estimated several parameters related to the implantation (R_P , ΔR_P , ...). In addition, we have studied the channeling phenomenon resulting from the impact of the ions beam orientation of the ions with respect to the sample surface.

Experimentally, the samples have been prepared by ion implantation of Sb^+ (dose = $1 \times 10^{15} Sb^+/cm^2$, $1.6 \times 10^{15} Sb^+/cm^2$, energy = 120 keV, in Si (111) substrates) or As^+ (dose = $1.5 \times 10^{16} As^+/cm^2$, energy = 100 keV, in Si (100) substrates). Afterwards, thermal annealing (900 ° C, 30min) have been performed under vacuum. We adopted RUMP, RBX and SIMNRA programs to analyze RBS spectra in random mode. We were able to estimate different parameters of ion implantation which were in agreement with simulation. Concerning the experimental spectra in channeling mode, we have used the suitable RBX program. This program allowed us to estimate the thickness of the damaged layer of the target and to plot the curves of defects. Concerning the heat treatments, by these annealings, a good restoration of radiation has been achieved. Moreover, the impurities (As or Sb) have been electrically activated.

The samples have also been analyzed by other techniques such as X-Ray Diffraction (XRD), Infra Red spectroscopy by Fourier Transform (FTIR), Photoluminescence spectroscopy (PL) and four points resistivity.

Key words: ion-matter interactions, silicon, antimony, Arsenic, Rutherford backscattering spectroscopy (RBS).

Optimisation de l'implantation ionique de l'antimoine ou de l'Arsenic dans le silicium

Résumé :

Dans ce travail, plusieurs paramètres liés à l'implantation ionique, de l'antimoine ou de l'arsenic dans un substrat de silicium, ont été étudiés. Cette investigation a été réalisée expérimentalement et par l'utilisation de programmes de simulation appropriés.

Dans le cas théorique, nous avons utilisé deux programmes SRIM et C-TRIM pour simuler et prévoir tous les phénomènes physiques résultant des collisions des ions avec les atomes cibles. Nous avons également obtenus les différentes distributions (lacunes, ions,) en profondeur de la cible, avec l'estimation de plusieurs paramètres d'implantation (R_p , ΔR_p ,). En outre, nous avons étudié le phénomène de canalisation résultant de l'impact de l'orientation des faisceaux des ions par rapport à la surface de l'échantillon.

Expérimentalement, les échantillons ont été élaborés par implantation ionique de Sb^+ (dose = $1 \times 10^{15} Sb^+/cm^2$, $1.6 \times 10^{15} Sb^+/cm^2$, énergie = 120 keV, dans des substrats de Si(111)) ou As^+ (dose = $1.5 \times 10^{16} As^+/cm^2$, énergie = 100 keV, dans des substrats de Si(100)). Par la suite, un recuit thermique (900 ° C, 30min) sous vide poussé a été utilisé. Nous avons adopté les programmes RUMP, RBX et SIMNRA pour analyser les spectres expérimentaux en mode random de la technique RBS. Nous avons pu, à travers ces programmes, estimer les différents paramètres de l'implantation et ils ont été en accord avec les prévisions de la simulation.

Concernant les spectres expérimentaux en mode canalisé, nous avons utilisé le programme RBX parce qu'il a été conçu spécialement pour cette fin. Ce programme nous a permis d'estimer l'épaisseur de la couche endommagée de la cible et de tracer les courbes des défauts générés dans le substrat. Concernant les traitements thermiques, nous avons obtenus une bonne réparation des défauts d'irradiation et une activation électrique des dopants dans les échantillons.

D'autres techniques de caractérisation ont également été mises en œuvre à savoir la diffraction des Rayons X (DRX), la spectroscopie Infrarouge par transformée de Fourier (FTIR), la photoluminescence (PL) et la résistivité par quatre pointes.

Mots clés : interactions ion-matière, Silicium, Antimoine, Arsenic, Spectroscopie de Rétrodiffusion Rutherford (RBS).

ملخص :

في هذا العمل، تمت دراسة عدة معاملات مرتبطة بعملية الزرع الأيوني للأنتمان أو الزرنخ في مسند من السليكون. هذه الدراسة تحققت تجريبيا و كذلك بواسطة استعمال برامج مناسبة للمحاكاة. في الحالة النظرية استعملنا برنامجين هما SRIM و C-TRIM لمساعدتنا على المحاكاة و التنبؤ بجميع الظواهر الفيزيائية الناتجة عن تصادمات الايونات مع ذرات المسند. تحصلنا كذلك على مختلف التوزيعات مثل الفجوات و الأيونات داخل المسند، مع تقديرنا لعدة معاملات خاصة بالزرع الأيوني ($R_p, \Delta R_p, \dots$). بالإضافة إلى ذلك، قمنا بدراسة ظاهرة الإستثناء الناتجة عن أثر توجيه حزمة الايونات بالنسبة لسطح العينة و التي يحاكيها برنامج C-TRIM.

تجريبيا، العينات المستعملة تحصلنا عليها عن طريق الزرع الأيوني لأيونات Sb^+ أو As^+ . فبالنسبة للعنصر الأول استعملنا جرعات مختلفة $1E15Sb^+cm^2$ و $1.6E15Sb^+cm^2$ و بطاقة تقدر بـ $120keV$ في ركائز من السليكون أحادي التبلور ذو التوجيه $\langle 111 \rangle$. أما العنصر الثاني استعملنا جرعة $1.5E16As^+cm^2$ و بطاقة تقدر بـ $100keV$ في ركائز من السليكون أحادي التبلور ذو التوجيه $\langle 100 \rangle$. هذه العينات كانت متبوعة بمعالجة حرارية عند $(900^\circ C, 30min)$ تحت فراغ جيد. اعتمدنا في تحليلنا للأطياف التجريبية في الهندسة العشوائية الخاصة بتقنية RBS على برنامج RBX, RUMP و SIMNRA. استطعنا من خلال هذه البرامج تقدير مختلف المعاملات الخاصة بالزرع الأيوني و هي في توافق مع التنبؤات. فيما يتعلق بالأطياف التجريبية في هندسة الاستثناء الخاصة بتقنية RBS، فإننا استعملنا برنامج RBX لأنه يمتلك هذه الخاصية. هذا البرنامج سمح لنا بتقدير سمك الطبقة المتضررة للمسند و إنشاء منحنيات العيوب المتولدة في المسند. فيما يخص المعالجة الحرارية فإننا تحصلنا بواسطتها على إصلاح جيد للأضرار و تنشيط الشوائب المضافة التي تعمل على تحسين الخصائص الكهربائية للعينات. لقد قمنا أيضا باستعمال مطيافية انعراج الأشعة السينية، مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه، مطيافية التآلق الضوئي و تقنية الأربع نقاط من أجل دراسة العينات.

الكلمات المفتاحية: التفاعلات أيون-مادة، السليكون، الأنتمان، الزرنخ، مطيافية الانتشار الارتدادي لروذرفورد (RBS).