

دراسة شبه تجريبية لمدى توزع أيونات B ,Al ,P, As المزروعة في السيلكون الأمورفي

الدكتور بدر الأعرج*
الدكتور مفيد عباس**

(تاريخ الإيداع 29 / 4 / 2009 . قَبْلُ للنشر في 2009/10/22)

□ الملخص □

تهدف هذه الدراسة إلى إيجاد R مدى توزع أيونات B ,Al ,P, As المسرعة بطاقات في المجال 300 – 50 keV المزروعة في هدف سيلكوني باستخدام طريقة شبه تجريبية لأشابته بحاملات شحنة من النوع n و p ثم حساب مقدار التشتت ΔR_p عن مسقط مسار الأيون R_p على امتداد الحزمة الأيونية الواردة، وذلك بافتراض أن وسيط التصادم يأخذ قيمة مختلفة من نصف قطر بور الذري. لقد تم حساب R باستخدام التكامل العددي وذلك بكتابة برنامج في Matlab .

ولوحظ من الدراسة أن مدى توزع الأيونات المزروعة يزداد تدريجياً بزيادة طاقة الأيون المزروع وزيادة وسيط التصادم في المجال $0.053 - 0.795 \text{ \AA}$.

الكلمات المفتاحية: زرع الأيونات- مسقط مسار الأيون- مدى مسار الأيون- وسيط التصادم- طاقة الحزمة الأيونية- مقطع الكبح الإلكتروني - مقطع الكبح النووي.

* أستاذ- قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية- سورية.
** أستاذ - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Semi-Empirical Study of Range Distribution of Implanted Ions B , Al , P , As in Amorphous Silicon Target

Dr. Badr Al- Aaraj *
Dr. Mufid Abbas **

(Received 29 / 4 / 2009. Accepted 22/10/2009)

□ ABSTRACT □

This paper aims to calculate the distribution range R of implanted ions B ,Al ,P ,As in silicon target which accelerated to energies ranged between 50 – 300 keV using semi-empirical method in order to dope the Si –semiconductor with n and p type of charge carriers. In addition, we calculate the scattering parameter (standard deviation) ΔR_p from the projected range R_p .

For calculating R we used the numerical integration by writing a Matlab program in suggesting that the impact parameter p takes different values of Bohr radius.

It is shown that the range distribution of implanted ions increases gradually by rising the ion beam energy and also by crowing the impact parameter in the interval 0.053 – 0.80Å.

Keywords: ion implantation, projected range, ion path range, impact parameter, ion beam energy, electronic cross- section, nuclear cross-section

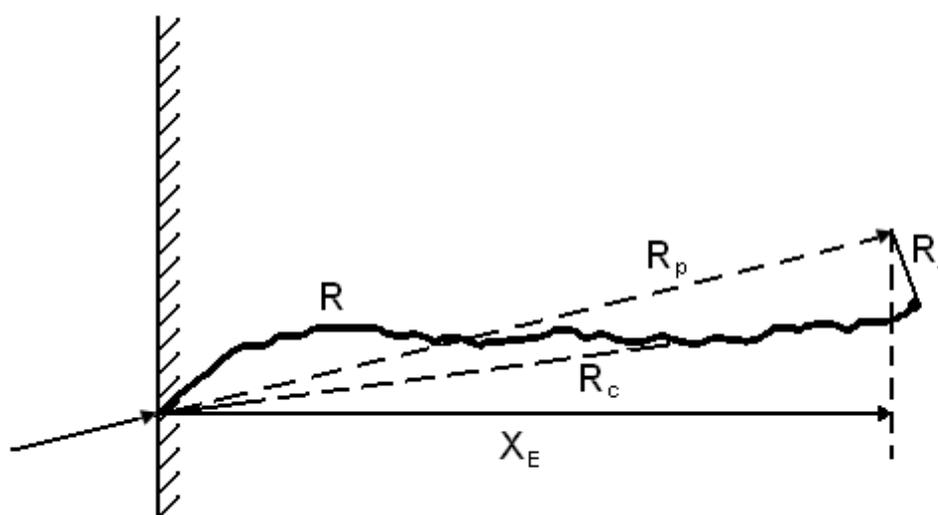
* Professor, Physics Department , Faculty of Science , Tishreen University, Lattakia , Syria.

** Professor, Physics Department , Faculty of Science , Tishreen University, Lattakia , Syria.

مقدمة:

جاءت إشابة أنصاف النواقل بتقانة الزرع الأيوني بعد طريقة الأشابة بطريقة الانتشار التقليدية. وتعد طريقة زرع الأيونات طريقة متطورة ومرنة لإشابة بلورات الجسم الصلب، وتتم عملية الزرع كما يلي: تدخل الأيونات المسرعة إلى بلورة الجسم الصلب وتصطدم مع ذراتها ثم تفقد طاقتها الحركية تدريجياً إلى أن تصل بالنهاية إلى حالة السكون داخل البلورة.

يتوقف عمق توغل الحزمة الساقطة على البلورة على عدة عوامل منها: نوع ذرة الإشابة، مادة الهدف، الطاقة الأولية للحزمة، درجة الحرارة، الجرعة الأيونية، ودرجة التخلية. يبين الشكل 1 مسار الأيون داخل الهدف والرموز المتعلقة به.



الشكل 1: يوضح الرموز الآتية:
R مسار الأيون المزروع داخل الهدف.
R_p مسقط المسار على امتداد اتجاه الأيون الوارد على سطح الهدف.
R_L المركبة العمودي للمسار.
R_c المسافة بين نقطة دخول الأيون وموضع استقرار هـ.
X_E عمق التوغل.

تعالج الأسس النظرية لزرع الأيونات في الأجسام الصلبة، توزع أعماق توغل الأيونات المزروعة، و فقد طاقتها بفعل عمليات الفرملة، وتوزع التشوهات والعيوب الناتجة عن عمليات الزرع في البلورة، ثم دراسة سلوك توغل الأيونات في الأجسام الصلبة الأمورفية (الزرع العشوائي)، والأجسام الصلبة وحيدة التبلور ومتعددة التبلور (الزرع المقناة) [1,16,17,18].

يمكننا تصنيف المفاعيل الناتجة عن عملية قذف الأيونات في الجسم الصلب كما يلي:

1. تصادمات مرنة وغير مرنة مع الالكترونات الحرة والمقيدة لذرات الهدف.
2. تصادمات مرنة وغير مرنة مع نوى ذرات الهدف.

وتوجد آليتين رئيسيتين لفقد الطاقة بوحدة المسار أثناء تفاعل الأيونات المقذوفة مع ذرات الهدف.

• **الكبح الإلكتروني:** فقد الطاقة بالتصادمات غير المرنة مع الإلكترونات المقيدة. لقد درست هذه العملية من قبل Lindhard و Winter وبيننا أن مقطع الكبح الإلكتروني $S_e(E)$ يتناسب مع سرعة الأيونات المقذوفة ، وبالتالي مع الجذر التربيعي لطاقة الحزمة الأيونية في مجال الطاقات المألوفة [5,4,3,2].

$$\frac{dE}{dx} \propto S_e(E) = kE^{1/2} \quad (1)$$

ولإيجاد فقد الطاقة بالكبح الإلكتروني قدم Firsov نموذجاً يفترض أن الأيون الصادم وذرة الهدف يشكلان معاً شبه جزيئه . ويحصل أثناء عملية التصادم تبادل بين الكترونات شبه الجزيئة مما يؤدي إلى انتقال جزء من الطاقة الحركية للأيونات إلى ذرة الهدف وبالتالي كبح الأيون [4,3].

$$\Delta E_e(E, p) = \int_0^{\infty} T_e(E, p) \cdot d\sigma_e = \frac{35 \times 10^{-2} (Z_1 + Z_2)^{5/3} \hbar \sqrt{\frac{2}{M_1}} \sqrt{E}}{a_0 (1 + 16 \times 10^{-2} (Z_1 + Z_2)^{1/3} \cdot \frac{p}{a_0})^5} \quad (2)$$

في هذه العلاقة تقدر الطاقة بـ keV والأبعاد بـ Å والكتل بوحدة الكتل الذرية amu. حيث $a_0 = 0.53 \text{Å}$ نصف قطر Bohr ، p وسيط التصادم ويعبر عن أقرب مسافة فاصلة يصلها الجسمين المتصادمين، $\hbar = 0.659 \times 10^{-18} \text{keV} \cdot \text{sec}$ ، المقطع التفاضلي الإلكتروني، T_e الطاقة الحركية المنتقلة بفعل التصادم مع الإلكترونات المقيدة.

يبين الجدول 1 بعض الوسيطات الخاصة بالأيون المسرع وذرة الهدف.

الجدول 1 : بعض الرموز الخاصة بالأيون المسرع وذرة الهدف.

الوسيط	الأيون الصادم	ذرة الهدف
العدد الذري	Z_1	Z_2
الكتلة الذرية	M_1	M_2
السرعة	V_1	-

• **الكبح النووي:** يتناسب فقدان الطاقة بالتصادمات المرنة مع نوى ذرات الهدف ومع مقطع الكبح النووي

$$\frac{dE}{dx} \propto S_n(E) . \text{ وتعطى طاقة الفقد بالعلاقة [5,4]:}$$

$$\Delta E_n = \int_0^{\infty} T_n \cdot d\sigma_n = T_{\max} \cdot \cos^2 \left(\frac{\pi p}{2 \left[p^2 + a^2 \frac{V_s}{E_{cm}} \right]^{1/2}} \right) \quad (3)$$

حيث:

$$V_s = \frac{Z_1 Z_2 e^2 a}{d^2}$$

الأيون وذرة الهدف . وعندما $d=a$ نحصل على كمون الحجب [7,6].

$$T_{\max} = \frac{4M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} E$$

الطاقة العظمى المنتقلة عند التصادم المركزي (المباشر).

$$E_{cm} = \frac{M_2}{(M_1 + M_2)} E$$

طاقة مركز الكتل للجسمين المتصادمين.

$$e^2 = e_0^2 / 4\pi\epsilon_0 = 1.44 \times 10^{-2} keV \cdot \text{\AA}$$

$$a = \frac{1}{2} \left(\frac{3}{4} \pi \right)^{2/3} a_0 (Z_1^{1/2} + Z_2^{1/2})^{-2/3}$$

ويعتمد سيطرة أحد المفعولين على الآخر على طاقة الأيونات المسرعة وكتلتها، وعلى الكتلة والعدد الذري لذرات الهدف.

وبالتكامل العددي للعلاقة الآتية نحصل على مدى التوغل R للأيونات ذات الطاقة E_0 [12,11,10,9,8].

$$\frac{dE}{dx} = NS_e + NS_n \quad (4)$$

$$R(p, E_0) = \int_0^{E_0} \frac{dE}{\Delta E_e + \Delta E_n} \quad (5)$$

أهمية البحث وأهدافه:

تتجلى أهمية هذا البحث في التحديد المسبق لعمق توزع الأيونات المزروعة عن طريق التحكم بالشروط الابتدائية لطاقة الزرع للحصول على عينات نصف ناقلة من السيليكون بخصائص ومواصفات جديدة، ثم إيجاد قيم وسيط التصادم المناسبة لمجال طاقات التسريع بطريقة شبه تجريبية.

طرائق البحث ومواده:

لقد تم حساب عمق التوغل R بالتكامل العددي للعلاقة (5) وذلك بكتابة برنامج في Matlab . ولحساب التكامل العددي افترضنا أن وسيط التصادم يأخذ القيم : 10%, 25% , 50% , 100% , 150% من نصف قطر بور الذري. علاوة على ذلك، أخذنا قيم طاقات التسريع للأيونات في المجال 50 – 300 keV .

النتائج والمناقشة:

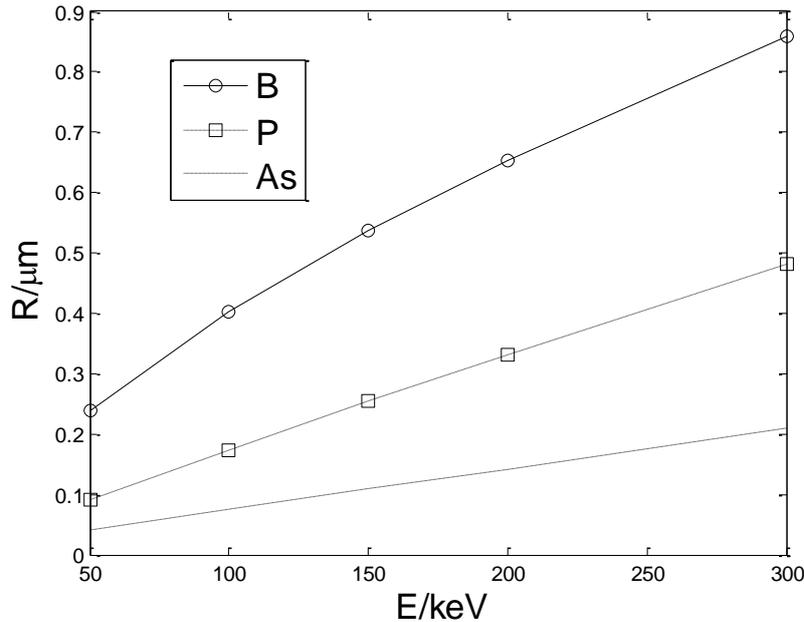
أشارت النتائج التجريبية لوسيط التصادم للأيونات $19 \leq Z_1 \leq 26$ أنه يأخذ قيمة في المجال $0.76 - 1.01 \text{ \AA}$ [10,9]. وهذا ما دعانا إلى دراسة تأثير وسيط التصادم على عمق توزع الأيونات المزروعة، وذلك بافتراض أن وسيط التصادم يأخذ قيمة نسبية من نصف قطر بور، وذلك لدراسة سلوك الأيونات $5 \leq Z_1 \leq 33$ المسرعة في المجال الطاقى $50 - 300 \text{ keV}$.

يبين الشكل 2 الرسم البياني لقيم تجريبية مأخوذة من المرجع [1] لمقارنتها مع قيمنا المحسوبة بطريقة شبه تجريبية.

يحتوي الجدول 2 على نتائج التكامل العددي لأيون البور.

الجدول 2 : يتضمن القيم المحسوبة بالتكامل العددي لأيون البور.

E/keV	50	100	150	200	250	300
$R_p/\mu\text{m}$	0.5786	1.9635	3.8721	6.1246	8.6060	11.2399
$\Delta R_p/\mu\text{m}$	0.9130	3.0761	5.9557	9.2423	12.7483	16.3586



الشكل 2 : يبين عمق توزع أيونات B, P, As بتابعة طاقتها في Si . القيم مأخوذة من [1] .

نلاحظ من الشكل أن أيون البور يتوغل بشكل بارز مقارنة مع أيون الفوسفور والزرنيخ. ونعزو ذلك إلى أن نصف قطر ذرة البور أصغر (انظر الجدول 3) . لذا يمكنه التوغل إلى الفراغات والاستقرار داخل الهدف بعد فقد طاقته، ومن جهة أخرى، يتناسب عمق التوغل عكساً مع مقطع الفرملة والذي بدوره يتناسب طردياً مع العدد الذري لأيون الصادم، وبالتالي يكون مقطع الفرملة، عند الزرنيخ أعلى منه عند البور، ويتحقق عكس ذلك بالنسبة إلى عمق التوغل [13].

يحتوي الجدول 3 على نصف القطر الذري والكثافة الذرية للعناصر المدروسة.

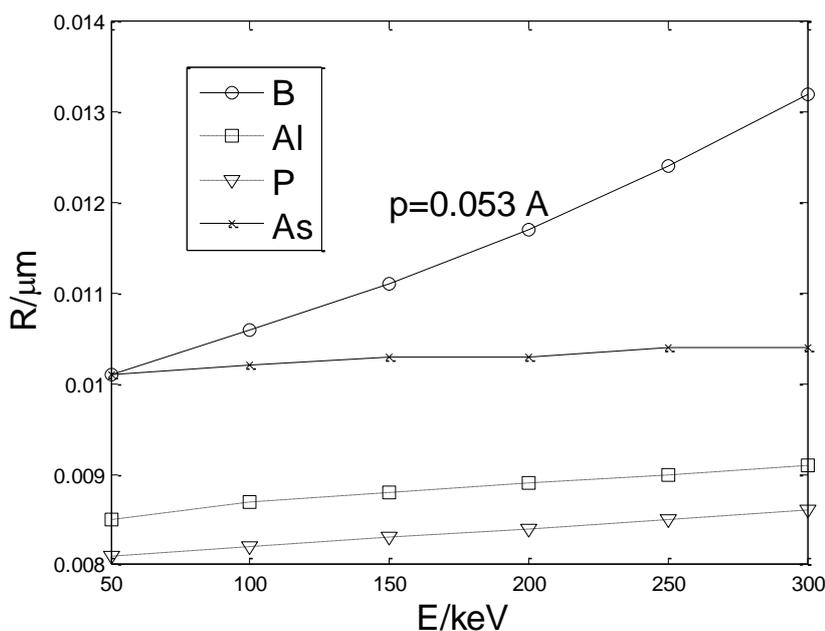
الجدول 3 : يحتوي على نصف القطر الذري والكثافة الذرية.

Element	Si	B	Al	P	As
$r_a / \text{Å}$	1.17	0.088	1.26	1.10	1.21
N/cm^3	1.30×10^{23}	6.02×10^{22}	-	4.05×10^{22}	5.00×10^{22}

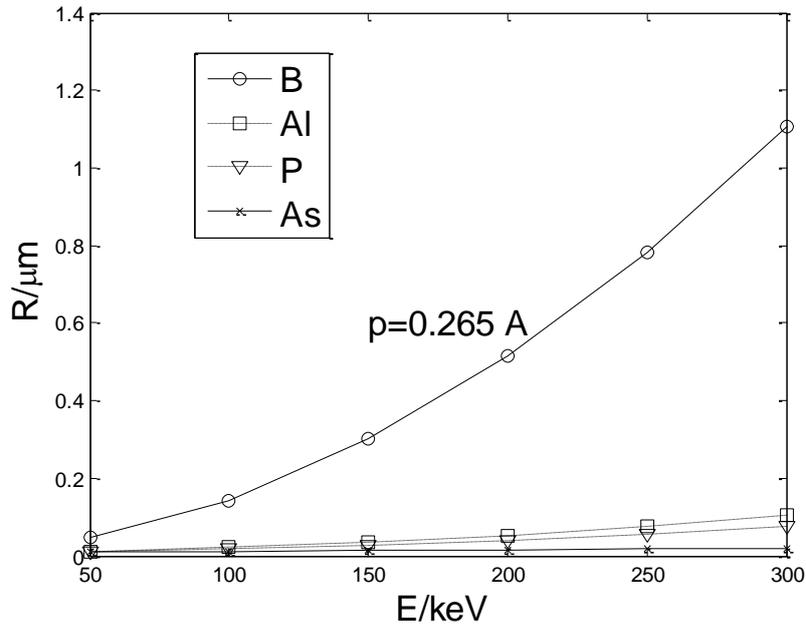
توضح الأشكال (3, a – e) الدور البارز لأيون البور في توغله داخل الهدف السيلكوني . ونلاحظ من الشكل (3 –a) أن عمق توغل أيونات الألمنيوم والفسفور والزرنيخ شبه مستقل عن وسيط التصادم عند القيمة $p=0.053 \text{Å}$. وأشير في [15,14] إلى أن عمق التوغل $(\text{Si}(110) \rightarrow B^+ 20 \text{keV})$ يبلغ $R=0.6 \mu\text{m}$. ويمكننا أخذ فكرة عن حساب تقريبي لوسيط التصادم من العلاقة الآتية [5] .

$$p = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2 d}{E} \right)^{1/2}$$

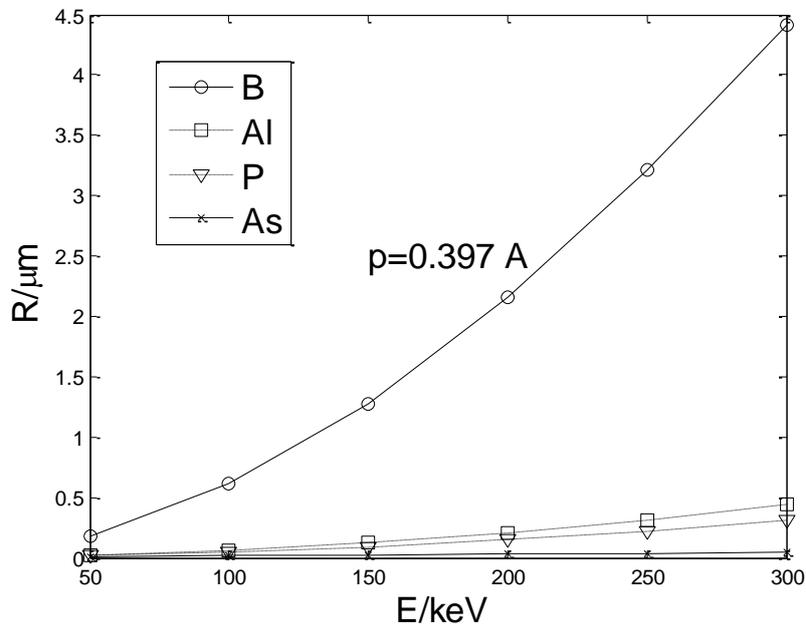
$$d(\text{Si}) = \left(\frac{6}{\pi N_{\text{Si}}} \right)^{1/3} = 2.45 \text{Å}$$



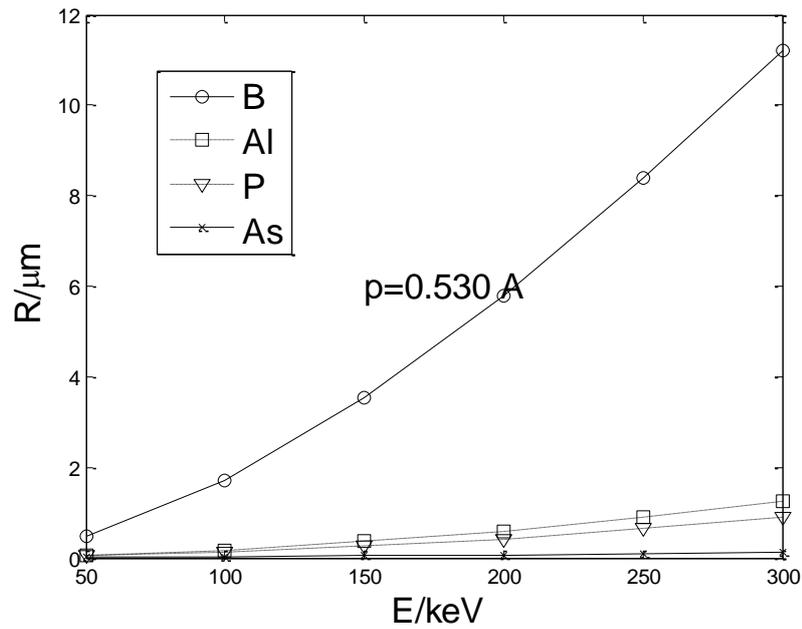
الشكل 3-a : يبين تابعة مدى توزع أيونات B ,Al ,P, As لطاقتها عند وسيط تصادم $p= 0.053 \text{Å}$



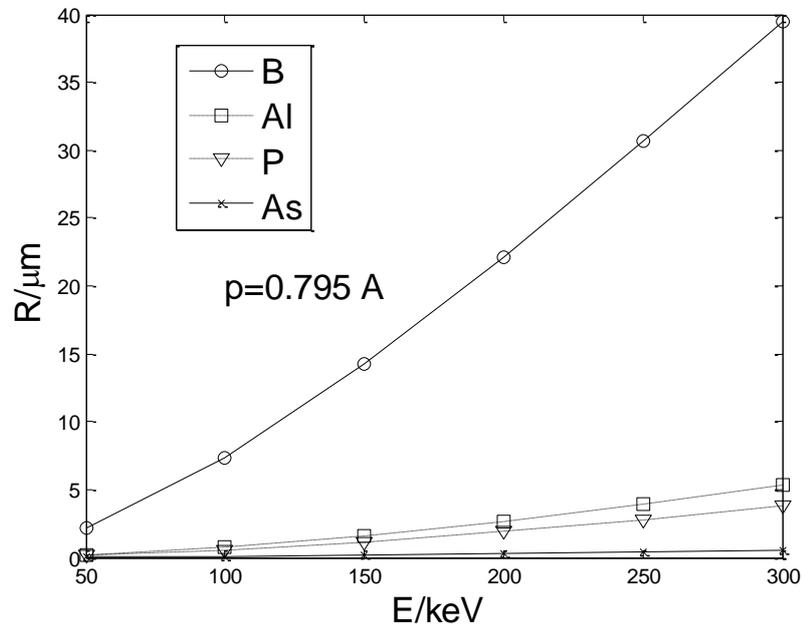
الشكل 3-b : يبين تابعة مدى توزع أيونات B, Al, P, As لطاقتها عند وسيط تصادم $p=0.265\text{Å}$.



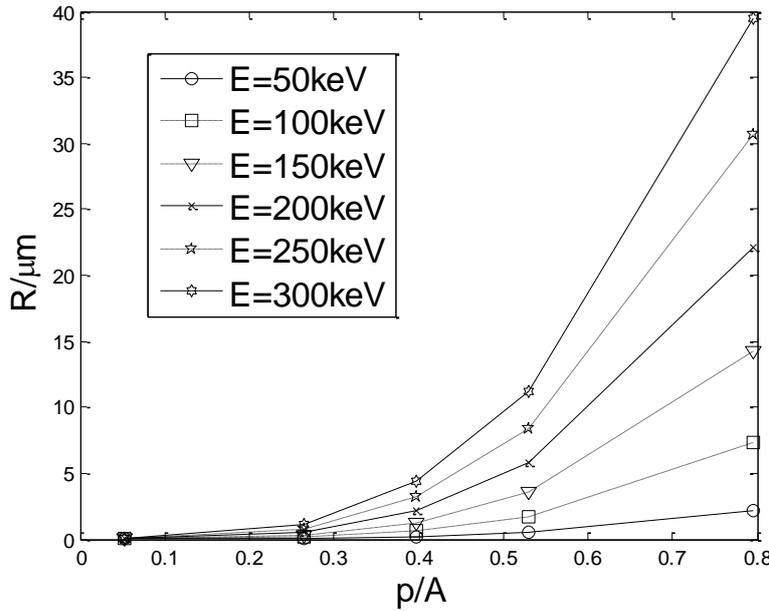
الشكل 3-c : يبين تابعة مدى توزع أيونات B, Al, P, As لطاقتها عند وسيط تصادم $p=0.397\text{Å}$.



الشكل 3-d : يبين تابعة مدى توزع أيونات B ,Al ,P, As لطاقتها عند وسيط تصادم $p=0.530\text{Å}$.



الشكل 3-e : يبين تابعة مدى توزع أيونات B ,Al ,P, As لطاقتها عند وسيط تصادم $p=0.795\text{Å}$.



الشكل 4 : يظهر تابعة مدى أيون البور المزروع لوسيط التصادم عند طاقات مختلفة.

ونلاحظ من الشكل 4 وجود مجالين .

المجال الأول: يمتد من $p = 0.05 - 0.3 \text{ \AA}$ ويوجد تطابق بين سلوك الأيونات مع اختلاف طاقتها. ويناسب

هذا المجال من وسيط التصادم طاقات التسريع المقترحة ، وبصورة خاصة يوجد شبه تطابق بين قيمنا المحسوبة عند القيمة $p = 0.265 \text{ \AA}$ والقيم التجريبية التي لم يذكر عندها قيمة وسيط التصادم.

المجال الثاني: يمتد من $p = 0.3 - 0.8 \text{ \AA}$. وفي هذا المجال نلاحظ فرز فعالية طاقة التسريع مع وسيط

التصادم. ولكن قيم مدى توزع الأيونات في هذا المجال كبيرة نسبياً، بالمقارنة مع القيم التجريبية، مما يؤكد أن المجال الأول هو المناسب لطاقات التسريع المقترحة.

الاستنتاجات والتوصيات:

استناداً إلى نموذج Firsov يمكننا أخذ صورة تقريبية عن توزع الأيونات المسرعة في السليكون بعد معرفة

وسيط التصادم.

وينقسم المخطط البياني لعمق التوغل بتابعية وسيط التصادم إلى مجالين .

المجال الأول: يمتد من $p = 0.05 - 0.3 \text{ \AA}$ حيث وسيط التصادم هذا يناسب طاقات التسريع المقترحة. وعند

القيمة $p = 0.265 \text{ \AA}$ يوجد شبه تطابق بين القيم المحسوبة والقيم التجريبية.

المجال الثاني: يمتد من $p = 0.3 - 0.8 \text{ \AA}$ ويبين التأثير الواضح لوسيط التصادم على عمق التوغل.

ويمكننا متابعة هذا العمل بدراسة تركيز الأيونات المزروعة بتابعية العمق عند معرفة وسيط التشتت ΔR_p و R_p

ثم إيجاد معدل الذرات المزاحة في الهدف بفعل الأيون المسرع مستفيدين في ذلك من القياسات التجريبية للتشوهات

بطريقة التشتت المرند لـ رزرفورد RBS ، ومن أعماق توزع الذرات القريبة المقاسة تجريبياً بطريقة SIMS .

Abbreviation

amu: atomic mass unit

Matlab: Matrix Laboratory
RBS: Rutherford Backscattering
SIMS: Secondary Ion Mass Spectrometry

المراجع:

- [1] YSSEL,H.R; RUGE ,I. *Ionenimplantation*, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1978, 10 .
- [2] LINDHARD , WINTER,J. A. 1964-Kgl. *Danske Videnskab.Selskab.Mat.-Fys.Medd.*, No.4, 1959,34.
- [3] FIRSOV ,O.B. *Zh.Eksp,Teor.Fiz.*, V.. 36,No.3, 1959,1517.
- [4] FIRSOV , O.B. 1958-*Zh.Eksp.Teor.Fiz.*, V. 34,No.2, 1958,447.
- [5] ABBAS ,M. et al. *Heavy Ion Channeling Implantation Processes in Crystals*, phys.stst.sol.(b),1990, 159.
- [6] FIRMI,E. *Z.Phys*,V.48,1928, 73.
- [7] MAYER,MARC, J. W.; NICOLET,A. *Backscattering Spectrometry*,Academic Press ,New York, San Francisco, London,1978, 150.
- [8] MANFRED von ARDENNE,GERHARD MUSIOL,SIEGFRIED REBALL.*Effekte der Physik*,VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften,Berlin,1989, 200.
- [9] WILSON,R.G. *J.Appl.Phys*.61 ,8,1987, 2734 – 2736.
- [10] EISEN,F.H. *channeling of medium ions through silicon*, Science Center of North American Rockwell Corporation ,Calif.,USA,1967, 9
- [11] REINER WEDEL. *Reichweiten und Sputtering bei niedrigen Energien*,Wiss. Zeitschrift der Humboldt Universitaet , Berlin,1985, 158.
- [12] MICHAEL GRIEPENTROG und RALF KOECHERT, *Ionenstrahlverfahren zur Veraenderung von Festkoepferoberflaechen*, Wiss. Zeitschrift der Humboldt Universitaet , Berlin,1988, 269.
- [13] XIANGDONG LIU, PIJUN LIU, FENG CHEN, MINGWEN ZHAO, YUCHEN MA, MINJU, JIANHUA ZHANG, QINGMING LU, CHUNSHENG WANG. *Electronic stopping powers for fluorine ions in F-implanted tin-oxide films prepared by APCVD*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 187 ,2002, 431–436.
- [14] HIDETOSHI KIMURA WATARU TAKEUCHI. *New local model for electronic energy loss and its application to computer simulations of channeling*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 266 ,2008, 224–228.
- [15] BIANCONI , M.; ARGIOLAS,N.; BAZZAN,M. ; BENTENI,G.; ChIARNI, CERUTTI, G. M. ; A. ; MAZZOLDI,P.; PENNESTRI, SADA G. *Nuclear and electronic energy loss synergy in the process of damage growth in ion implanted LiNbO3*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 249 , 2006, 122–125.

- [16] مفيد عباس. *مميزات زرع الأيونات الثقيلة باتجاه القنوات* ، المجلد (16) 'العدد (3) ، مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية، 1994
- [17] مفيد عباس ،محمد فاهود. *دراسة نظرية لحركة الأيونات المزروعة في الاتجاه المحوري لعينة هدف كريستالية* ،المجلد (19) 'العدد (6) ، مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية، 1997
- [18] يحيى سليمان 'د. محمود أحمد ، د.مفيد عباس. *زرع الأيونات في الأجسام الصلبة* ،المجلد (14) 'العدد (1) ، مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية، 1992