

## حسابات نظرية لحاصل ترديد سطح النيكل بوساطة حزمة ايونات بلازما الزينون

دريد هاني يونس

قسم علوم الفيزياء / كلية التربية للعلوم الصرفة – ابن الهيثم / جامعة بغداد

استلم البحث في : 18 شباط 2013، قبل البحث في 10 حزيران 2013

### الخلاصة

انجزت حسابات موسعة لعملية ترديد هدف من النيكل المقصوف بوساطة بلازما ايونات الزينون. تشتمل الحسابات على تغيير معاملات الإدخال لكل من طاقة ايونات بلازما الزينون و زاوية سقوطها في هدف النيكل وسمك طبقة الهدف وتأثير التغيير الطفيف في طاقة ربط السطح على حاصل التردد. لقد وظف البرنامج TRIM لانجاز هذه الحسابات. تظهر النتائج أن حاصل التردد يعتمد اعتمادا مباشرا على هذه المعلمات إذ ان تغيير زوايا سقوط حزمة ايونات البلازما وطاقتها تؤدي الى تغيير محسوس في نواتج حاصل التردد. وفي ما يتعلق بالهدف من حيث سمك طبقة المقصوفة وطاقة ربط سطحه عند ثبوت معاملات الايونات لها تأثير مباشر في حاصل التردد.

الكلمات المفتاحية: حاصل التردد – برنامج TRIM- ايونات بلازما الزينون - النيكل

### المقدمة

من تطبيقات البلازما المهمة عملية ترديد المواد عندما تفاعل ايوناتها مع هذه السطوح. فعندما تصطدم أيونات حزمة البلازما بالهدف، فانها تفقد الطاقة عن طريق آليتين: هما التصادم المرن النووي، والتصادم غير المرن الالكتروني. يمكن لهذه الايونات، اعتمادا على طاقتها، ان ترتد مباشرة إلى الوراء قبالة الهدف، او يمكنها ان تنعكس من السطح بعد سلسلة من التصادمات المتعاقبة او تكون في حالة سكون في اخر المطاف حيث تغرس في الهدف عند عمق معين داخل الهدف تحت سطح العينة، إذ ان التصادم هو تصادم غير مرن لذلك سوف تفقد الايونات كمية كبيرة من الطاقة إلى حساب الهدف وتصبح بالنهاية متعادلة كهربائيا. ويمكن للايونات ايضا ان تطرد إلكترونات ثانوية نتيجة لذلك التصادم. وتحدث ايضا استطرارة غير مرنة تؤدي الى إنتاج الفونونات، والبلازمونات في المعادن [1]. اما بالنسبة الى ذرات او ايونات الهدف فانها تطرد من مواقعها الاصلية. ويتم خلال عملية القصف هذه نقل الطاقة والزخم من الأيونات الساقطة إلى ذرات الهدف. فاذا كانت الطاقة الحركية بما يكفي للتغلب على طاقة ربط السطح فان الذرة سوف يحصل لها ترديد من السطح [2].

فيزيائيا يشار الى عملية التردد بكونها عملية تصادمية يؤخذ فيها بنظر الاعتبار انتقال الطاقة الحركية والزخم من الايونات المقذوفة على الهدف الى ذراته. وينظم نقل الطاقة والزخم لسلسلة من اسهامات الطاقة بين عدد كبير من ذرات الهدف داخل الهدف. فاذا نقل زخم كاف لذرة الهدف في اتجاه السطح العمودي، بحيث انه هناك ما يكفي من الطاقة الحركية للتغلب على طاقة الربط فانه سيتم ترديد ذرات الهدف من السطح [3]. يمكن وصف عملية تشكيل سلسلة التصادمات من الناحية التحليلية باستخدام تطبيق نظريات النقل الإحصائية، أو عن طريق استخدام المحاكاة الحاسوبية، التي تتبع تطور سلسلة التصادمات من تصادم الى اخر. ان لكل من هذه الطرائق لها أساس متماثل؛ حيث في جميعها تفترض صحة تقريب التصادم الثنائي، أي مقذوفات تواجه ذرات الهدف بشكل تسلسلي. [4]

من أجل انجاز عملية التردد، نحتاج إلى البلازما لغرض توليد مصدر للأيونات التي ستضرب وتاكل الهدف. هناك نوعان رئيسان من الانظمة المستخدمة لإنتاج البلازما لغرض التردد، هي التفريغ التوهجي و بلازما الترددات الراديوية (RF). وعادة ما تكون هذه الأيونات من الغازات النبيلة، مثل الأروكون والنيون، أو الزينون [5]، ويمكن أيضا أن يستخدم النيتروجين. والاختيار الأمثل للأيونات؛ ينبغي أن يكون على اساس ان الأوزان الذرية للأيونات وذرات الهدف تكون متقاربة.

من برنامج المحاكاة التي توظف عملية التردد هو برنامج TRIM. تأتي تسمية البرنامج TRIM من الحروف الاولى من العبارة الانكليزية (Transport of Ions in Matter) وهو برنامج يعد من البرامج الأكثر شمولية المدرج في البرنامج العام المسمى SRIM. و البرنامج TRIM هو عبارة عن خوارزمية مونت كارلو [6] يتم فيها اتباع الأيونات الساقطة والارتدادات الناتجة من خلال عمليات التباطؤ لكل منها لغاية ان تكون طاقتها إلى ما دون طاقة العتبة. فيمكن بذلك تكوين حسابات مفصلة عن الطاقة المنقولة الى كل ذرة من ذرات هدف التصادم. ولكون ان البرنامج هو خوارزمية مونت كارلو فان البرنامج في طبيعته برنامج إحصائي يستخدم فيه جهد غلاف كولوم، ويشتمل على عملية التوقف الإلكتروني ايضا. في هذا البحث استخدم برنامج TRIM في حسابات حاصل التردد للنيكل بوساطة ايونات بلازما الزينون عند تغيير معاملات الإدخال الأهم في عملية التردد مثل الطاقة الحركية للايونات القاصفة، وزاوية سقوطها، وكذلك تغيير معاملات

الهدف مثل العمق بثبوت كل من طاقة ربط السطح والكثافة الكتلية للهدف وكذلك ملاحظة التغييرات الطفيفة في طاقة ربط السطح على حاصل التريذ بثبوت سمكه وثبوت معاملات ايونات البلازما الساقطة.

## النظرية

عند قصف حزمة من أيونات الزينون لسطح رقيق من النيكل ، سيحدث تصادم بين الأيونات الساقطة و سطح النيكل، مما يؤدي إلى ظاهرة التريذ. وبشكل عام يستعمل حاصل التريذ في وصف كفاية إزالة المواد. ويعرف حاصل التريذ [7] بأنه المتوسط الإحصائي لنسبة عدد الذرات المزالة إلى عدد الجسيمات القاصفة:

$$Y = \frac{\text{atoms removed}}{\text{incident particle}} \quad (1)$$

إن تعريف حاصل التريذ يفترض أن عدد ذرات المزالة يتناسب مع عدد الجسيمات الساقطة في حين أن كل العوامل الأخرى تبقى ثابتة. وحيث أن الهدف مادة صلبة، وأن حزمة الأيونات تقذف بطاقة  $E_0$  وزاوية سقوط  $\theta_0$  ، فإن ذلك يؤدي إلى سلسلة من التصادمات المرنة مع ذرات الهدف عند إهمال الاثارة الإلكترونية للهدف [8]. إن ذرة من ذرات الهدف ستقوم بحركة ارتداد بعد حصولها على الطاقة من عملية التصادم ويمكن أن تسبب لحركة ارتداد للذرات الأخرى. ولذلك، سيتم تكوين سلسلة من حركات التصادم للذرات حول مسار الأيون الساقط. فإذا كان اتجاه حركة بعض الذرات التي تقوم بالحركة المتسلسلة باتجاه السطح الصلب، وإذا كانت الطاقة الحركية أكبر من طاقة الربط السطح فأنها تكون قادرة على التغلب على قيود السطح ومن ثم يحصل التريذ.

من الواضح أن قيمة حاصل التريذ تتناسب مع عدد ذرات المتحركة المتسلسلة. إن الطاقة اللازمة لقيام الذرات بالحركة المتسلسلة المتتالية تكون على حساب خسائر الطاقة من الأيون الساقط ، لذلك يرتبط حاصل التريذ بالأيونات الساقطة. بشكل عام في عملية التريذ ، تكون طاقة الأيونات قليلة ، بحيث يمكن إهمال تأثير قدرة التوقف الإلكترونية في الدالة  $F_D(x, E, \theta)$ . ولما كانت عملية التصادم مرنة بين النوى لعملية التريذ، سيتم الأخذ بنظر الاعتبار التصادم على سطح الهدف، وهذا يعني أن الذرات المرتدة يجب عليها التغلب على قيود سطح الهدف قبل التريذ. لذلك، يمكن أيضا التعبير عن حاصل التريذ [8]:

$$Y(E_0, \theta_0) = \Lambda F_D(0, E_0, \theta_0) \quad (2)$$

إذ إن  $\Lambda$  هو عامل يرتبط بمادة الهدف ، ويرتبط فقط بمميزات الهدف، مثل طاقة ربط السطح. يعبر عن المعادلة  $F_D(x, E_0, \theta_0)$  في الحسابات العددية [8]:

$$F_D(0, E_0, \theta_0) = \alpha N S_n(E_0) \quad (3)$$

إذ إن  $N$  هي الكثافة الذرية للهدف، و  $\alpha$  هي عامل التصحيح، الذي يكون دالة للنسبة الكتلية مابين كتلة الهدف المقصوف إلى كتلة الجسيم المقذوف  $M_2/M_1$  والزاوية السقوط الأولية، وأن  $S_n(E_0)$  هي المقطع العرضي للتوقف النووي. لذلك يمكن وصف حاصل التريذ [8]:

$$Y(E, \eta) = \Lambda \alpha N S_n(E_0) \quad (4)$$

إذ إن  $\eta$  هي معلمة عامة للطاقة. من أجل حساب دقيق لحاصل التريذ، يمكن استعمال المقطع العرضي للتوقف النووي ، إذ تعطي  $S_n(E)$  بالمعادلة [8]

$$S_n(E) = \frac{8.462 Z_1 Z_2}{(1+M_2/M_1)(Z_1^{0.23} + Z_2^{0.23})} S_n(\epsilon) \quad [10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2] \quad (5)$$

إذ إن  $Z_1$  و  $Z_2$  هما الأعداد الذرية لكل من الجسيم الساقط ومادة الهدف المقصوفة على التوالي، و إن  $\epsilon$  هي الطاقة المختزلة ، التي تعطي بالمعادلة [8]

$$\epsilon = \frac{32.53 M_2 E}{Z_1 Z_2 (1+M_2/M_1)(Z_1^{0.23} + Z_2^{0.23})} \quad (6)$$

إن وحدة الطاقة للأيون الساقط  $E$  هي keV، وأن  $S_n(\epsilon)$  حد الانخفاض في المقطع العرضي النووي. لحزمة من الأيونات طاقتها  $\epsilon \leq 30$  ، فإنها توصف بالمعادلة [8]

$$S_n(\epsilon) = \frac{0.5 \ln(1+1383\epsilon)}{\epsilon + 0.0132\epsilon^{0.21226} + 0.19593\epsilon^{0.5}} \quad (7)$$

## النتائج والمناقشة

### (1) اعتماد حاصل التريذ على زاوية السقوط

يوضح الشكل (1) آثار زيادة طاقة قصف أيونات الزينون على حاصل التريذ للنيكل. لقد ثبتت زوايا أيونات سقوط الأيونات وغيرت طاقتها. إن حاصل التريذ للنيكل يكون أكبر عند زوايا سقوط  $\phi_m$  القريبة من  $80^\circ$  معتمداً في ذلك على طاقة الأيونات القاصفة، فكلما زادت قيمة طاقة أيونات الزينون زادت قيمة حاصل التريذ إلى زوايا أكبر كما يظهر ذلك من الشكل. وهذه الصفة لا تكون حصراً للنيكل المقصوف بأيونات الزينون وإنما لاهداف أخرى مثل الحديد أو البريليوم

المقصوفان بالايونات خفيفة مثل الهليوم او الهيدروجين [9]. ولجميع طاقات ايونات تتطابق نسبيا نواتج حاصل التريزيم بعضها على بعض عند الزوايا سقوط الصغيرة والمتوسطة وتبدأ بالافتراق عند زوايا أكبر من  $60^0$ . في الشكل ثبتت اعداد الايونات الساقطة على الهدف وتساوي 1000 ايون. ولجميع الطاقات المستعملة كانت ملائمة fitting الحسابات معطاة بالمعادلة:

$$y = p_1z^6 + p_2z^5 + p_3z^4 + p_4z^3 + p_5z^2 + p_6z + p_7 \quad (8)$$

إذ ان  $p_1, p_2, \dots, p_7$  هي ثوابت تختلف من منحني الى اخر، ويعطي الجدول (1) قيم هذه الثوابت حسب طاقات ايونات الزينون الساقطة على هدف النيكل. وان  $z$  تمثل بيانات المتغير المستقل وهي زوايا سقوط ايونات الزينون.

## (2) تأثير طاقة الايونات الساقطة في حاصل التريزيم

يظهر الشكل (2) اعتماد حاصل التريزيم للنيكل على طاقة أيونات بلازما الزينون وفي ثلاث زوايا سقوط فق إذ ط. يلاحظ من الشكل تأثير الزيادة لكل زوايا السقوط إذ يزداد حاصل التريزيم بشكل لاخطي ليصل الى حد التشبع ومن ثم في الزوايا الكبيرة يبدأ بالانخفاض. وانه كلما زادت زوايا السقوط كلما كان حاصل التريزيم أكبر. وفي حسابات هذا الشكل ثبتت اعداد الايونات الساقطة الى 1000 ايون. وتخضع كل منحنيات الزوايا المستعملة الى علاقة الملائمة الآتية:

$$y = p_1z^7 + p_2z^6 + p_3z^5 + p_4z^4 + p_5z^3 + p_6z^2 + p_7z + p_8 \quad (9)$$

إذ ان  $p_1, p_2, \dots, p_8$  هي كالسابق ثوابت تختلف من منحني الى اخر ويبين الجدول (2) هذه القيم حسب زوايا سقوط ايونات الزينون، وان  $z$  تمثل بيانات المتغير المستقل وهي طاقات ايونات الزينون الساقطة.

## (3) تأثير تغيير سمك هدف النيكل

يظهر الشكل (3): تأثير سمك هدف النيكل في حاصل التريزيم ولطاقتين من طاقات سقوط ايونات الزينون. يبين الشكل الزيادة اللاخطية لحاصل التريزيم عند زيادة سمك هدف النيكل ليصل اخيرا الى حد التشبع. وفي السمك الصغير الاقل من  $20^0$  يكون حاصل التريزيم لطاقة الايونات الساقطة 25 keV أكبر من تلك للطاقة 50 keV. لكن في الزوايا الأكبر من  $20^0$  فان الزيادة اللاخطية تكون أكبر. وعملية الملائمة تخضع للعلاقة الآتية:

$$y = p_1z^5 + p_2z^4 + p_3z^3 + p_4z^2 + p_5z + p_6 \quad (10)$$

إذ ان  $p_1, p_2, \dots, p_6$  هي كالسابق ثوابت تختلف من منحني الى اخر ويبين الجدول (3) قيم هذه الثوابت لطاقتين من ايونات الزينون الساقطة، وان  $z$  تمثل بيانات المتغير المستقل وهي سمك هدف النيكل.

ويظهر الشكل (4): تأثير سمك هدف النيكل في حاصل التريزيم عند تثبيت طاقة ايونات الزينون ولزوايا سقوط الايونات مختلفة. ان زيادة سمك الهدف تؤدي الى زيادة لاخطية لحاصل التريزيم. وواضح من الشكل تأثير زيادة زاوية السقوط في حاصل التريزيم، إذ يزداد حاصل التريزيم بزيادة زاوية السقوط لكل سمك مستعمل. وعملية الملائمة تخضع للعلاقة الآتية:

$$y = p_1z^5 + p_2z^4 + p_3z^3 + p_4z^2 + p_5z + p_6 \quad (11)$$

إذ ان  $p_1, p_2, \dots, p_6$  هي كالسابق ثوابت تختلف من منحني الى اخر ويبين الجدول (4) قيم هذه الثوابت لزوايتين من زوايا السقوط، وان  $z$  تمثل كالسابق بيانات المتغير المستقل وهي سمك هدف النيكل.

## (4) تأثير تغيير طاقة ربط سطح للنيكل

يوضح الشكل (5) تأثير زيادة ونقصان طاقة ربط السطح في حاصل التريزيم. هذه الدراسة تسمح لنا تحليل أثر التغيرات الصغيرة في طاقة ربط السطح على حاصل التريزيم. ان هذه المعلمة هي من قلب عملية التريزيم، وقيمة طاقة ربط السطح تكون في بعض الأحيان صعبة التقدير. لكل من الرسوم السابقة كانت طاقة ربط السطح المستعملة هي (4.46 eV). ونلاحظ التناسب العكسي لحاصل التريزيم مع زيادة طاقة ربط السطح. ويظهر الشكل ايضا تأثير اعداد ايونات الزينون الساقطة إذ ان زيادة اعداد الايونات الساقطة على الهدف تؤدي الى نقصان حاصل التريزيم.

## الاستنتاجات

نفذت حسابات هذا البحث باستعمال برنامج المحاكاة TRIM لدراسة حاصل التريزيم لهدف من مادة النيكل عند قصفه بأيونات بلازما الزينون. وتمت تغيير معاملات الدخل لحزمة الايونات الساقطة فضلا عن الهدف لرؤية كيفية تأثيرها في نواتج حاصل التريزيم. لقد وجدنا في هذه الدراسة ان افضل زوايا سقوط لهذه الايونات هي عندما تكون قريبة من زاوية  $80^0$  وانه كلما زادت طاقة الايونات الساقطة كان حاصل التريزيم أكبر. كذلك درسنا تأثير سمك الهدف في حاصل التريزيم وان الاخير يحصل له اشباع عند الاسماك الكبرى مقارنة مع تلك الصغيرة عند تغيير كل من طاقات الايونات الساقطة وزوايا سقوطها. ودرس كذلك تأثير طاقة ربط السطح في حاصل التريزيم. وهذه الطاقة حساسة جدا، فأى خطأ فيها يؤدي الى نواتج حاصل التريزيم تكون خاطئة.

## المصادر

1. Lucille,A. Giannuzzi and Fred,A. Stevie (2005) Introduction to Focused Ion Beams: Instrumentation, Theory, Techniques, and practice. Springer.
2. Moshfegh,A. Z. (2009) „Sputtering Deposition: Physics and Technology,3rd international workshop on physics and technology of thin films.
3. Sigmund,P. (1969) Theory of sputtering. I. Sputtering yield of amorphous and polycrystalline target”, physical review, (148), (2), 383 - 416
4. Gillen,D. R.; Graham,W.G. and Goelich,A. (2002),“Sputtering of copper atoms by keV atomic and molecular ions: A comparison of experiment with analytical and computer based models” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 194 , 409– 416
5. Kirk,A. Zoerb (2007) „Differential sputtering yields of refractory metals by ion bombardment at normal and oblique incidences, M. Sc Thesis, Colorado State University.
6. Ziegler,J. F.; Biersack J. P. and Ziegler,M. D. (2012) „SRIM: The Stopping and Range of Ions in Matter, Lulu. Com.
7. Nakles M. R.; (2004), Experimental and Modeling Studies of Low-Energy Ion Sputtering for Ion Thrusters, M. Sc Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
8. Guping D.; Tingwen X. and Yun L. (2012) Preferential sputtering of Ar ion processing SiO<sub>2</sub> mirror, AOMATT, The 6<sup>th</sup> SPIE International symposium on advanced optical manufacturing and testing technologies.
9. Ono T.; Ono M.; Shibata K.; Kenmotsu T.; Li Z. and Kawamura T. (2012) „Calculation of sputtering yield with obliquely incident light-ions (H<sup>+</sup>, D<sup>+</sup>, T<sup>+</sup>, He<sup>+</sup>) and its representation by an extended semi-empirical formula”, Research report NIFS-DATA series, National Institute for Fusion Science.

جدول (1) : ثوابت معادلة الملائمة (8) المرسومة في الشكل (1) حسب طاقة ايونات الزينون الساقطة على الهدف

$p_7$	$p_6$	$p_5$	$p_4$	$p_3$	$p_2$	$p_1$	الطاقة (keV)
21.463	19.37	11.983	5.9211	0.11784	-3.6373	-1.5513	40
21.69	18.979	12.412	8.6231	1.8011	-4.4549	-2.1514	50
20.682	17.805	14.532	9.8931	0.72974	-4.3018	-1.6975	60

جدول (2) : ثوابت معادلة الملائمة (9) المرسومة في الشكل (2) حسب زوايا سقوط الايونات على الهدف

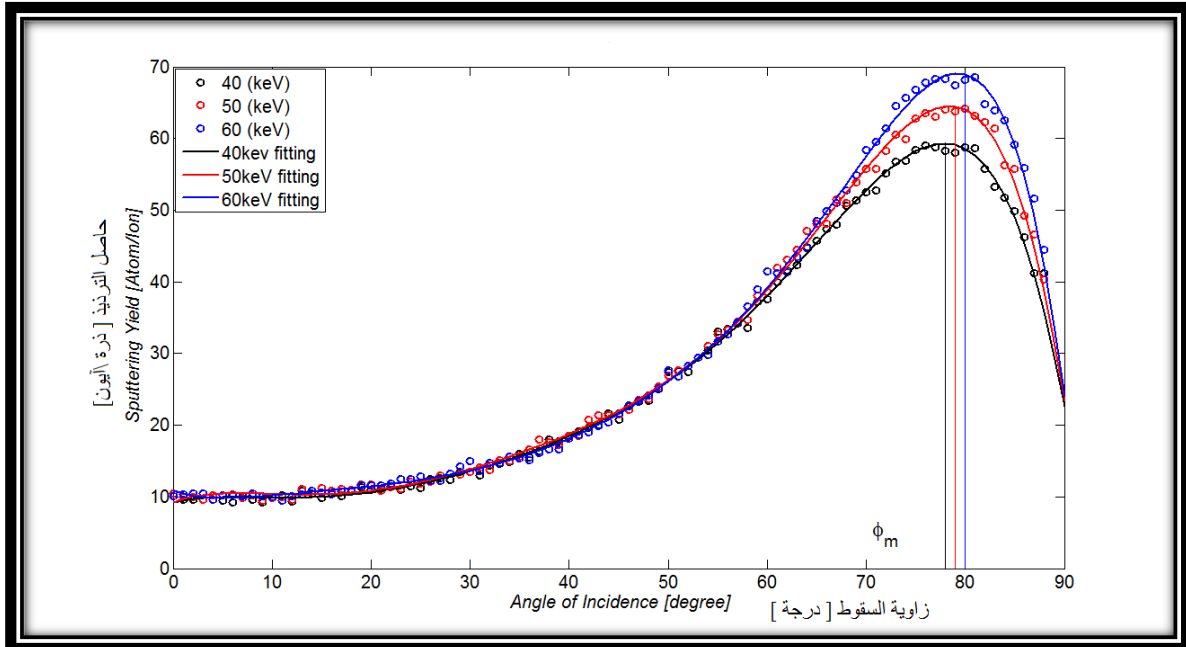
$p_8$	$p_7$	$p_6$	$p_5$	$p_4$	$p_3$	$p_2$	$p_1$	الزاوية
26.601	0.34427	-2.4679	0.95765	1.0573	-0.49291	-0.5461	0.2847	50 <sup>0</sup>
39.353	2.4638	-4.5252	-0.50398	1.9002	0.79087	-0.8929	0.0285	60 <sup>0</sup>
55.994	4.4122	-3.7096	8.4413	-0.71442	-5.0621	-0.3166	1.1732	70 <sup>0</sup>

جدول (3) : ثوابت معادلة الملائمة (10) المرسومة في الشكل (3) حسب طاقة ايونات الزينون الساقطة على الهدف

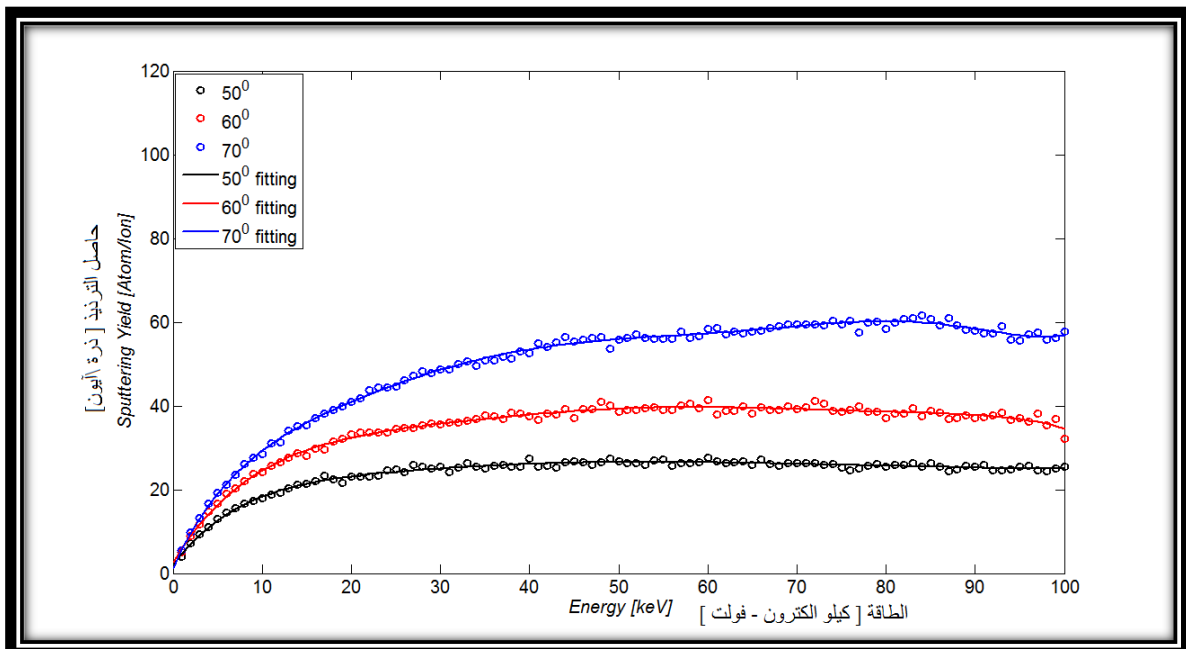
$p_6$	$p_5$	$p_4$	$p_3$	$p_2$	$p_1$	الطاقة (keV)
34.46	-0.039043	-0.18605	1.1118	-0.97996	0.2448	25
40.515	2.1733	-3.0764	2.2394	-0.45418	-0.0497	50

جدول (4) : ثوابت معادلة الملائمة (11) المرسومة في الشكل (4) حسب زوايا سقوط الايونات على الهدف

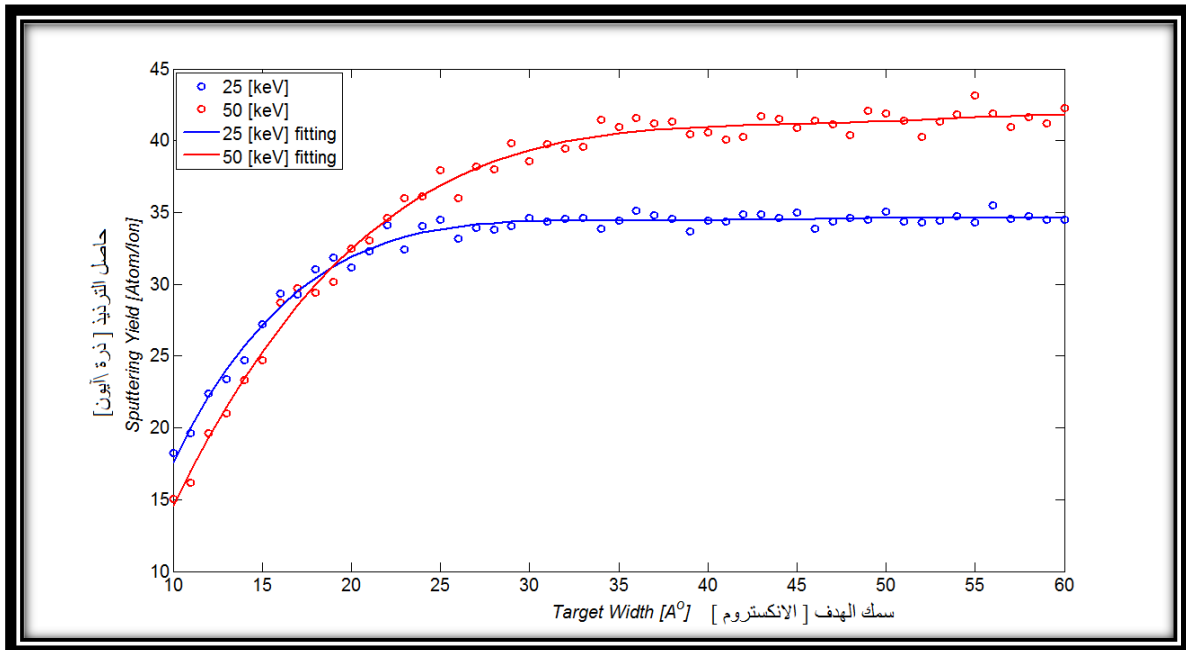
$p_6$	$p_5$	$p_4$	$p_3$	$p_2$	$p_1$	الزاوية
40.515	2.1733	-3.0764	2.2394	-0.45418	-0.0497	60 <sup>0</sup>
59.426	3.3244	-2.5191	3.4944	-1.2409	-0.23897	70 <sup>0</sup>



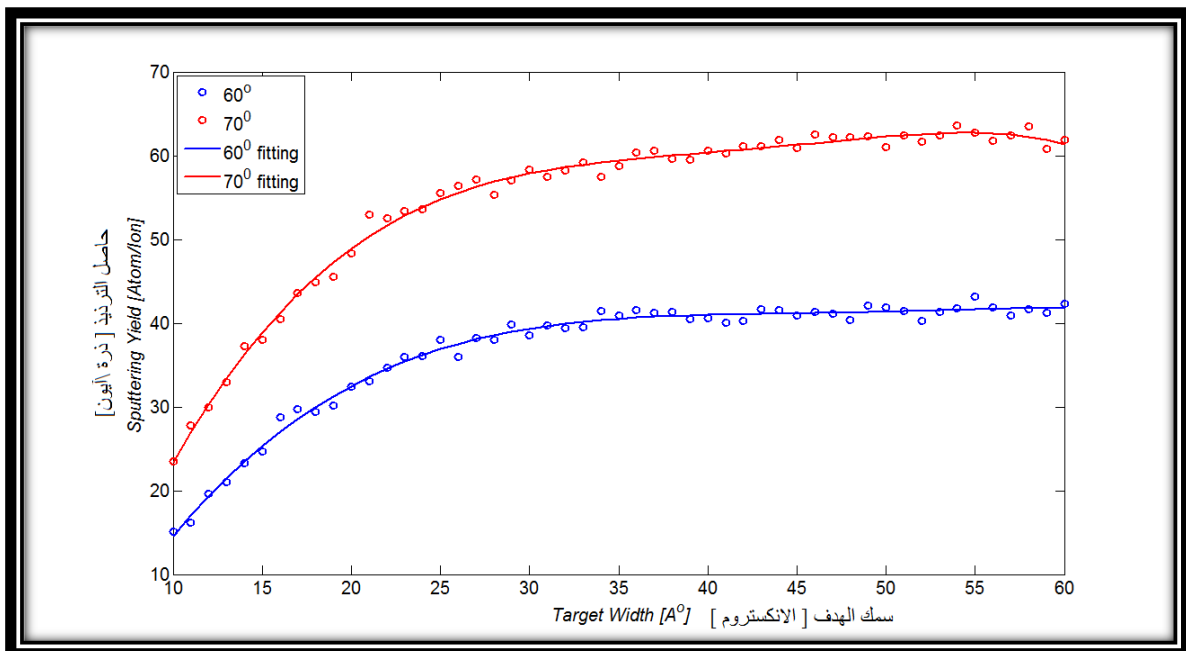
شكل (1): تأثير زوايا السقوط في حاصل التريز



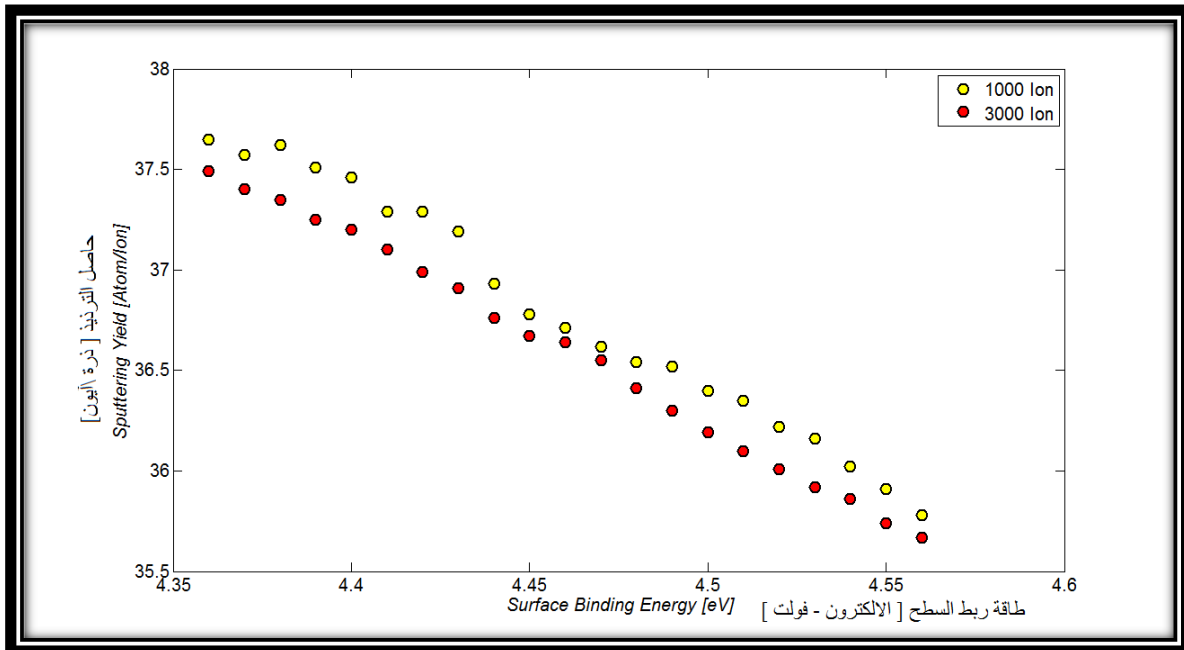
شكل (2): اعتماد حاصل التريز على طاقة الايونات الساقطة



شكل(3): تأثير سمك الهدف في حاصل التريذ لطاقات مختلفة من حزم ايونات بلازما الزينون



شكل (4) : تأثير سمك الهدف في حاصل التريذ لزاويا سقوط مختلفة



شكل (5) : تأثير طاقة ربط سطح مادة النيكل في حاصل التريذ



# Theoretical Calculations For Sputtering Yield of Nickel Surface Hitted By Xenon Plasma Ions

**Duraïd H. Younis**

Dept. of Physics /College of Education For Pure Sciences (Ibn Al-Haitham)/  
University of Baghdad

**Received in : 18February 1013 , Accepted in : 10June 2013**

## Abstract

Extended calculations for sputtering yield through bombed Nickel – target by Xenon ions plasma are accomplished. The calculations include changing the input parameters: the energy of xenon ions plasma, the hit target angle of nickel target, thickness of the nickel target layer, and the slight change in the surface binding energy of Nickel. The program TRIM is used to accomplish these calculations. The results show that the sputtering yields directly dependent on these parameters. The change in angles of incidence plasma ions and energy leads to a significant change in the sputtering yields. On the other hand, the sputtering yields ore highly affected by changing target width and surface binding energy at fixed ion parameters.

**Keywords-** sputtering process, Trim program, plasma xenon ions, nickel