تحديد الشروط المناسبة لترسيب أيونات النتروجين الصادرة عن البلازما المحرقية الكثيفة ضمن التيتانيوم

طالبة الدكتوراه: علا زيدان – كلية العلوم – جامعة حمص

الدكتور المشرف: أ.د. وليد صهيوني – المشرف المشارك: د. علاء ناصيف

ملخص

تمّ في هذا البحث إجراء محاكاة لتحديد شروط ترسيب أيونات النتروجين صادرة عن جهاز البلازما المحرقية الكثيفة UNU ICTP PFF (2.2 kJ) ضمن ركيزة التيتانيوم للحصول على الفلم الرقيق TIN. تمّ أولاً باستخدام كود Lee تحديد خصائص حزمة الأيونات الصادرة بعد انهيار قبضة البلازما وذلك عند تغيّر ضغط الغاز حيث كانت أعلى طاقة للحزمة 9.1 J عند الضغط 0.7 Torr والعدد الأعظمي للأيونات 1.96×10^{12} ions عند 1.9 Torr، ثم حساب أعلى طاقة يحملها أيون النتروجين 635.3237 keV. ثانياً تمّ تحديد المسافة المطلوبة لوصول الأيونات التي تحمل هذه الطاقة إلى ركيزة التيتانيوم تحت ظروف الضغط الجوي، أظهرت النتائج أن ركيزة التيتانيوم يجب أن تكون على بعد أقل من 0.1 μm من القبضة وذلك لضمان وصول أيونات النتروجين وأي مسافة أكبر ستؤدي إلى تخامد حزمة الأيونات ضمن الهواء.

الكلمات المفتاحية: البلازما المحرقية الكثيفة، حزم الأيونات، الفلم الرقيق TIN.

Determine the appropriate conditions for the deposition of nitrogen ions released by dense plasma focus within titanium

Abstract

In this research, a simulation was conducted to determine the conditions for the deposition of nitrogen ions emitted by the UNU ICTP PFF (2.2 kJ) dense plasma focus device on titanium substrate to obtain the thin film TIN. First, using Lee's code, the characteristics of the ion beam emitted after the collapse of the plasma pinch were determined when the gas pressure changed. The highest energy of the beam was 9.1 J at a pressure of 0.7 Torr, and the maximum number of ions was 1.96×10^{12} ions. At 1.9 Torr, then calculate the highest energy of nitrogen ion as 635.3237 keV. Secondly, the distance required for the ions carrying this energy to reach the titanium substrate was determined under conditions of atmospheric pressure. The results showed that the titanium substrate should be less than 0.1 µm from the pinch in order to ensure the arrival of the nitrogen ions, and any greater distance would lead to damped the ions beam in the air.

Keywords: dense plasma focus, ion beams, TIN thin fil

مقدمة:

تعتبر البلازما المحرقية أحد تطبيقات Z–pinch المغناطيسية حيث يستفاد من الحقول المغناطيسية المتولدة ذاتياً من أجل دفع طبقة البلازما محورياً على طول محور حجرة التفريغ وقطرياً ليتشكل في قمة المصعد عمود بلازما كثيف جداً ($\sim 1025–1026\ m^3$) حار جداً ($\sim 1–2$ KeV) لفترة قصيرة من الزمن (من مرتبة نانو ثانية) [1] [2] . تم تطوير أجهزة البلازما المحرقية في الأساس من أجل أبحاث الاندماج النووي عند استخدام غاز الديتيريوم أو مزيج ديتريوم – ترتيوم (D–T)، ولكن مع التقدم في الدراسات والأبحاث تبيّن أنه من الممكن الاستفادة من حزم الأيونات الناتجة عن انهيار عمود البلازما نظراً للطاقة التي تحملها في عدة تطبيقات مثل ترسيب الأفلام الرقيقة [3–5] ، تعديل سطوح المواد [6] [7] ، إنتاج النظائر المشعة قصير العمر [8–10] .

في مجال ترسيب الأفلام الرقيقة تم إجراء عدد كبير من الدراسات التجريبية لترسيب أفلام رقيقة بواسطة حزم أيونات صادرة عن أجهزة البلازما المحرقية ذات مواصفات أعلى من الطرق التقليدية (مثل طريقة الترسيب الكيميائي CVD)، حيث أعطت نتائج هذه الدراسات مواصفات مميزة للأفلام الرقيقة الناتجة مثل الالتصاق الجيّد للأيونات ضمن الركيزة [11] .

ولكن أمام تقنية ترسيب الأفلام الرقيقة بواسطة حزم الأيونات الصادرة عن أجهزة البلازما المحرقية تقف تحديات تشغيلية عديدة منها طاقة تشغيل جهاز البلازما المحرقية الكثيفة وأبعاد الالكترودات، نوع وضغط الغاز المستخدم ضمن الجهاز، بعد الركيزة المستهدفة، الترسيب بوجود الهواء في شروط التخلية. ولذلك قمنا في هذا البحث بدراسة مدى وصول أيونات النتروجين إلى ركيزة تيتانيوم بوجود الهواء وذلك من خلال مرحلتين: **الأولى** تحديد أعلى طاقة لأيونات النتروجين الصادرة، **الثانية:** تحديد البعد الأفضل لوصول هذه الأيونات وترسيبها ضمن ركيزة التيتانيوم.

منهج البحث:

تمّ إنجاز هذا البحث من خلال محاكاة حاسوبية على مرحلتين. تضمنت المرحلة الأولى استخدام كودLee لتحديد بارامترات البلازما النتروجين المحرقية وخصائص حزمة الأيونات الصادرة ضمن جهاز البلازما المحرقية UNU ICTP PFF، بينما تضمنت المرحلة الثانية دراسة إمكانية وصول أيونات النتروجين إلى ركيزة التيتانيوم تحت شروط الضغط الجوي باستخدام برنامج SRIM.

النتائج والمناقشة:

جهاز البلازما المحرقية الكثيفة UNU ICTP PFF:

يوجد هذا الجهاز في جامعة الأمم المتحدة– مركز عبد السلام الدولي للفيزياء النظرية/سنغافورة، تم تصميم هذا الجهاز وفق نموذج ماذر (Mather Type)، يتم تشغيل هذا الجهاز من خلال بنك مكثفات يعطي طاقة 1.8 – 3.3 كيلو جول، وتبلغ أعلى قيمة لتيار التفريغ 170–250 كيلو أمبير، يتم استخدام عدد من الغازات في عملية التشغيل (الديتريوم ، الأرغون، النيون، النتروجين....)، تحت ضغط يصل إلى 5.98 ملي بار. تم استخدام هذا الجهاز في العديد من التطبيقات مثل ترسيب الأفلام الرقيقة باستخدام الحزم الأيونية وإجراء التصوير الشعاعي باستخدام الأشعة السينية اللينة (SXR) [12] . قمنا في هذه الدراسة بإجراء سلسلة من التجارب العددية باستخدام كود **Lee** [13] وذلك لتحديد كل من بارامترات البلازما المحرقية المتشكلة وخصائص حزم أيونات النتروجين وذلك عند تغير ضغط الغاز وفق البارامترات الآتية:

الجدول 1: البارامترات التشغيلية لجهاز البلازما المحرقية الكثيفة UNU ICTP PFF

طاقة التشغيل **Operation Energy**	$E_0 = 2.2\ KJ$
تحريض الدارة **Inductance of circuit**	$L_0 = 110\ nH$
سعة بنك المكثفات **Capacitance**	$C_0 = 25\mu F$
المقاومة	$r_0 = 46\ m\Omega$

	Resistance
$V_0 = 15\ KV$	**كمون التشغيل** **Operation Voltage**
$P_0 = Variable$	**ضغط التشغيل** **Pressure**
$\mathrm{a} = 0.95\ cm$	**نصف قطر المصعد** **Anode radius**
$b = 3.2\ cm$	**نصف قطر المهبط** **Cathode radius**
$Z_0 = 16cm$	**طول المصعد** **Anode length**
N_2	**غاز التشغيل** **Working gas**

تم الاستفادة من مطابقة مساري التيارين المحسوب والمقاس من أجل تحديد **بارامترات النموذج: 0.15 ، 0.7 ، 0.2 ، 0.7.**

1. بارامترات البلازما المحرقية ضمن جهاز البلازما المحرقية الكثيفة UNU ICTP PFF:

تمّ استخدام كود Lee الإصدار (FIB 060613) [13] لإيجاد كل من ذروة التيار، تيار القبضة، سرعات البلازما، أبعاد القبضة (نصف القطر، الطول)، فترة بقائها، الكمون المتحرض ضمن القبضة، كثافة قبضة البلازما وذلك عند تغيّر ضغط غاز النتروجين وكانت النتائج الموضحة في الجدولين (2) و (3):

الجدول 2: بارامترات البلازما المحرقية عند تغير ضغط غاز النتروجين في جهاز UNU ICTP PFF

Pressure P (Torr)	Peak current I_{peak} (kA)	Pinch current I_{pinch} (kA)	Axial speed V_a(cm/µs)	Shock speed V_s (cm/µs)	Radial piston speed V_p (cm/µs)
0.10	122	83	15.5	60.6	39.4
0.20	135	92	12.4	52.1	33.4
0.30	141	96	10.8	44.1	30.1
0.40	144	97	9.7	38.0	26.9
0.50	146	98	8.9	34.1	24.5
0.60	148	98	8.3	31.3	22.4
0.70	149	97	7.7	28.9	20.7
0.80	150	95	7.3	27.1	19.3
0.90	151	94	6.9	25.4	18.1
1.00	152	92	6.6	23.9	17.0
1.10	153	89	6.3	22.6	16.0
1.20	153	87	6.0	21.4	15.1
1.30	154	84	5.7	20.2	14.3
1.40	154	82	5.5	19.2	13.6
1.50	155	79	5.3	18.2	12.9
1.60	155	76	5.1	17.3	12.2
1.70	156	73	4.9	16.3	11.6
1.80	156	69	4.7	15.5	11.0
1.90	156	66	4.6	14.6	10.4
2.00	157	62	4.4	13.7	9.9
2.10	157	59	4.3	13.0	9.4
2.20	157	55	4.1	12.1	8.8

الجدول 3: تابع: بارامترات البلازما المحرقية عند تغير ضغط غاز النتروجين في جهاز UNU ICTP PFF

Pressure P (Torr)	Pinch radius r_p (cm)	Pinch Length z_p (cm)	Pinch duration τ (ns)	Induced voltage V_{max} (kV)	Plasma density N_i ($\times 10^{23}/m^3$)
0.10	0.13	1.4	4.4	30	0.1
0.20	0.12	1.4	4.9	29	0.2
0.30	0.13	1.3	5.6	30	0.3
0.40	0.11	1.4	6.6	27	0.5
0.50	0.11	1.4	7.3	25	0.7
0.60	0.10	1.4	7.7	23	0.9
0.70	0.10	1.4	8.2	21	1.1
0.80	0.10	1.4	8.6	20	1.3
0.90	0.10	1.4	9.0	18	1.5
1.00	0.10	1.4	9.4	17	1.7
1.10	0.10	1.4	9.8	15	1.8
1.20	0.10	1.3	10.3	14	2.0
1.30	0.10	1.3	10.8	13	2.2
1.40	0.10	1.3	11.4	12	2.4
1.50	0.10	1.3	11.9	11	2.5
1.60	0.10	1.3	12.6	10	2.7
1.70	0.10	1.3	13.3	9	2.8
1.80	0.10	1.3	13.9	9	3.0
1.90	0.10	1.3	14.7	8	3.3
2.00	0.09	1.3	15.6	7	3.6
2.10	157	59	4.3	13.0	9.4
2.20	157	55	4.1	12.1	8.8

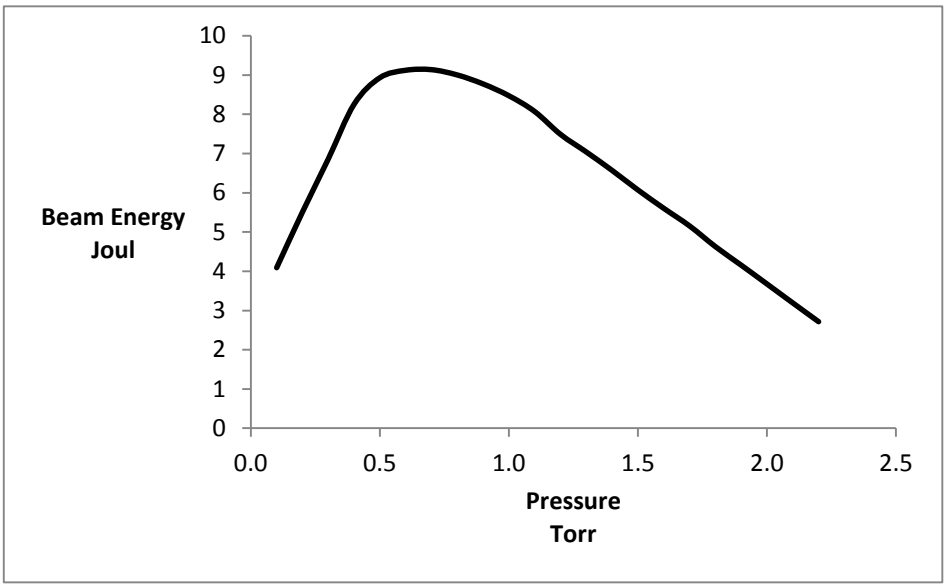
خصائص حزمة الأيونات الصادرة عن جهاز البلازما المحرقية الكثيفة UNU ICTP PFF:

وباستخدام كود Lee تمّ إيجاد خصائص حزم الأيونات الصادرة بعد انهيار قبضة البلازما (التدفق، طاقة حزمة الأيونات، عدد الأيونات الصادرة، الطاقة التي يحملها الأيون) عند تغيّر ضغط غاز النتروجين من **0.1 Torr** إلى **2 Torr** وكانت النتائج الموضحة في الجدول (4).

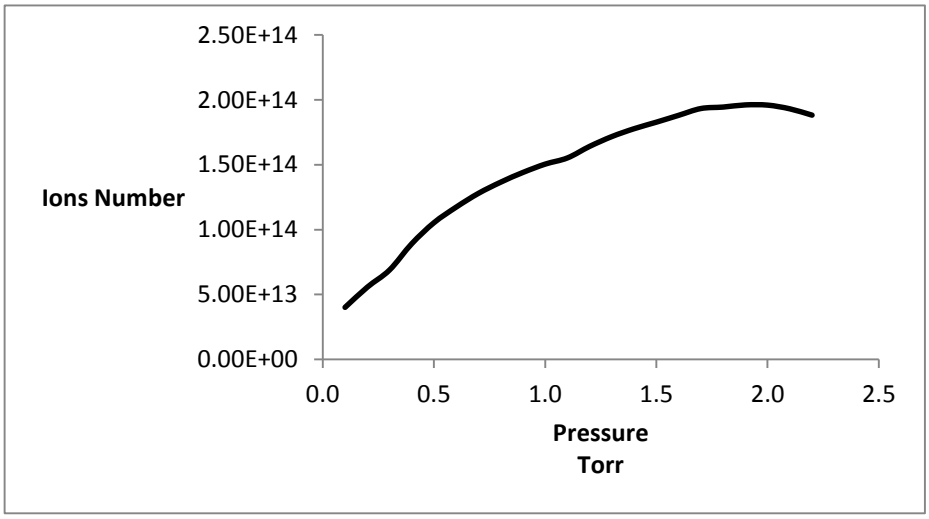
الجدول 2: خصائص حزم الأيونات عند تغير ضغط غاز النتروجين في جهاز UNU ICTP PFF

Pressure P (Torr)	Ions flux J_b ($\times 10^{27}$ $m^{-2}s^{-1}$)	Ions Beam Energy E_b (J)	Ions Number ($\times 10^{14}$)	Ion's Energy (keV)
0.10	1.8	4.1	0.4	635.3237
0.20	2.5	5.5	0.56	617.1074
0.30	2.4	6.9	0.69	621.3874
0.40	3.4	8.3	0.89	577.9772
0.50	4.1	8.9	1.1	529.2273
0.60	4.6	9.1	1.2	485.1433
0.70	5.0	9.1	1.3	445.831
0.80	5.2	9.0	1.4	411.5273
0.90	5.3	8.8	1.4	380.2484
1.00	5.3	8.5	1.5	351.553
1.10	5.3	8.1	1.6	324.5526
1.20	5.4	7.5	1.6	284.8052
1.30	5.3	7.0	1.7	255.9207
1.40	5.3	6.6	1.8	230.7106
1.50	5.2	6.1	1.8	207.3459
1.60	5.0	5.6	1.9	186.0169
1.70	4.8	5.2	1.9	166.4736
1.80	4.5	4.6	1.9	148.5928
1.90	4.1	4.2	2.0	132.2594
2.00	3.5	3.7	2.0	117.0823
2.10	2.9	3.2	1.9	103.1678
2.20	2.3	2.7	1.9	89.96496

يوضّح الشكلين (1) و (2) تغيّر طاقة حزمة الأيونات وعدد الأيونات مع تغيّر ضغط الغاز.

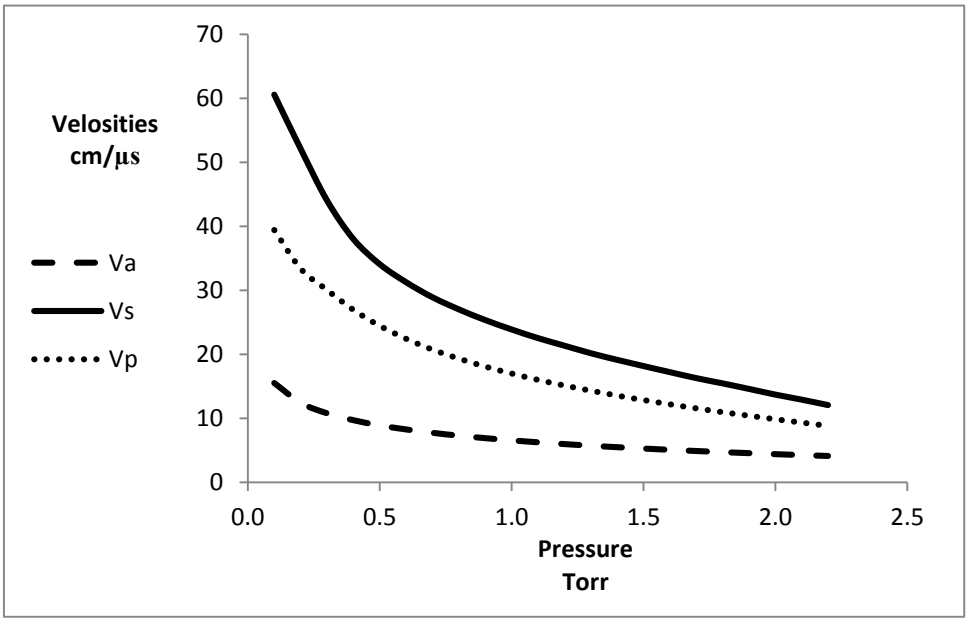


الشكل (1): تغيّر طاقة حزمة الأيونات مع تغيّر ضغط غاز النتروجين



الشكل (2): تغيّر عدد الأيونات مع تغيّر ضغط غاز النتروجين

يظهر من النتائج أن طاقة الحزمة لها قيمة عظمى 9.1 J عند الضغط 0.7 Torr كما أنها تكون أعلى عند الضغوط المنخفضة وذلك بسبب السرعات العالية للبلازما مما يؤدي إلى نشوء تأثيرات تحريضية أكبر مما يؤدي إلى إنتاج أيونات بطاقة أكبر. بينما يكون عدد أيونات الحزمة أكبر عند الضغوط المرتفعة حيث نلاحظ وجود قيمة عظمى 1.96×10^{12} ions عند الضغط 1.9 Torr بسبب أن سرعات البلازما تكون منخفضة جداً بحيث لا تتمكن من توليد أيونات بكفاءة حيث يوضح الشكل (3) تغيّر كل من السرعات (المحورية V_a، القطرية V_s، المكبس المغناطيسي V_p) عند تغيّر ضغط غاز النتروجين.



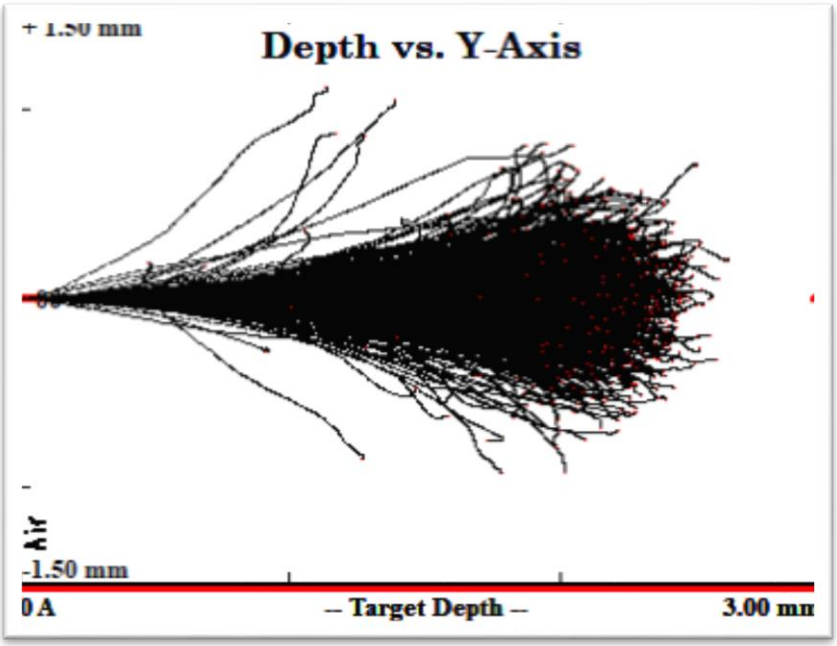
الشكل (3): تغيّر سرعات البلازما مع تغيّر ضغط غاز النتروجين

كما يظهر من النتائج أن أعلى طاقة يحملها أيون النتروجين 635.3237 keV عند الضغط 0.1 Torr لذلك سوف يتم استخدام الأيونات التي تحمل هذه الطاقة من أجل دراسة مدى وصول هذه الأيونات وترسبها على ركيزة التيتانيوم تحت شروط الضغط الجوي (بدون تخلية).

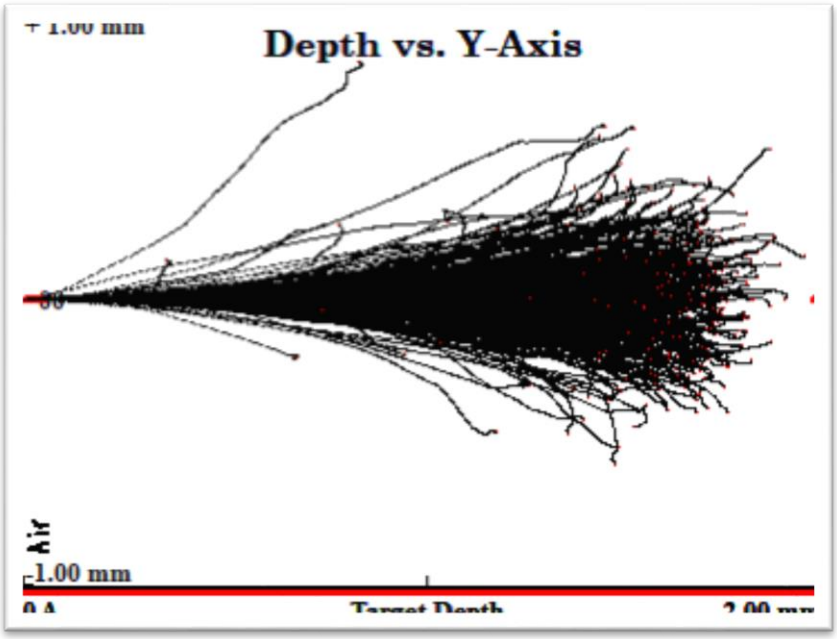
2. تحديد البعد الأفضل لوصول أيونات النتروجين إلى ركيزة التيتانيوم:

تمّ دراسة عمق اختراق أيونات النتروجين باستخدام برنامج SRIM– (The Stopping and Range of Ions in Matter) [14] داخل ركيزة من التيتانيوم وذلك بوجود الهواء وذلك لتحديد المسافة التي تتمكن من خلالها أيونات النتروجين من الوصول إلى ركيزة التيتانيوم واختراقها.

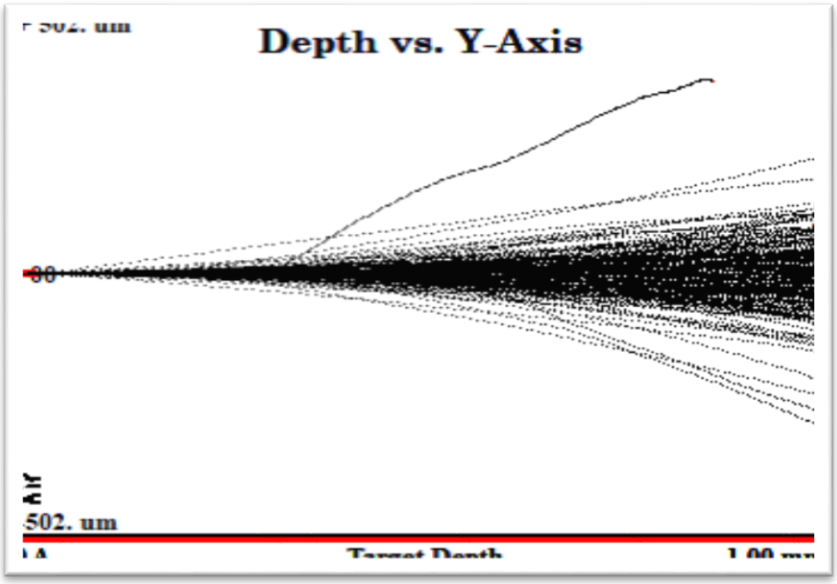
تمّ اختيار أعلى قيمة لطاقة أيون النتروجين 635.3237 keV عند الضغط 0.1 Torr ودراسة مدى أيونات النتروجين ضمن مسافة الهواء متبوعة بركيزة من التيتانيوم بسماكة 5 μm. توضح الأشكال الآتية مدى أيونات النتروجين عند مسافات مختلفة تفصل بين مصدر الأيونات والركيزة.



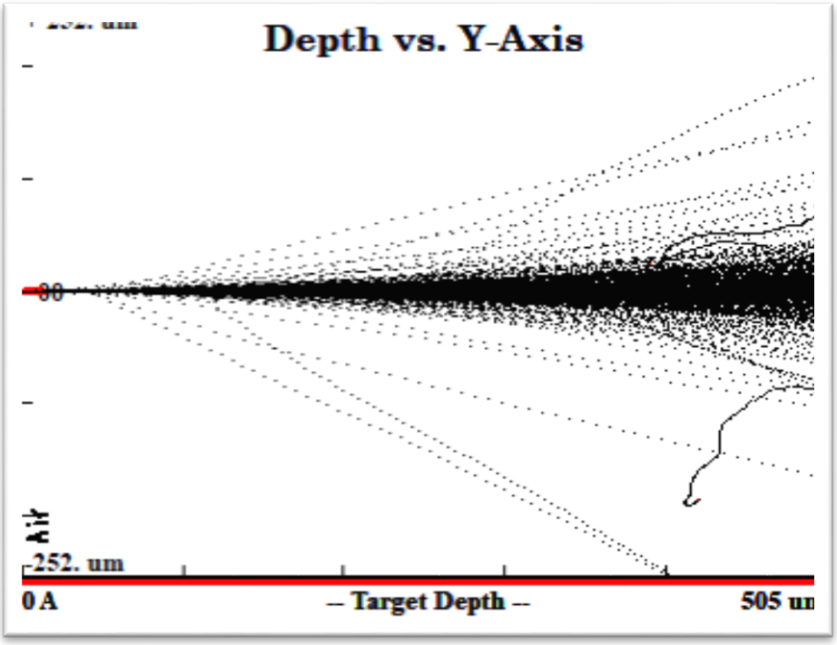
الشكل (4): مدى الأيونات عند مسافة 3 mm من الركيزة



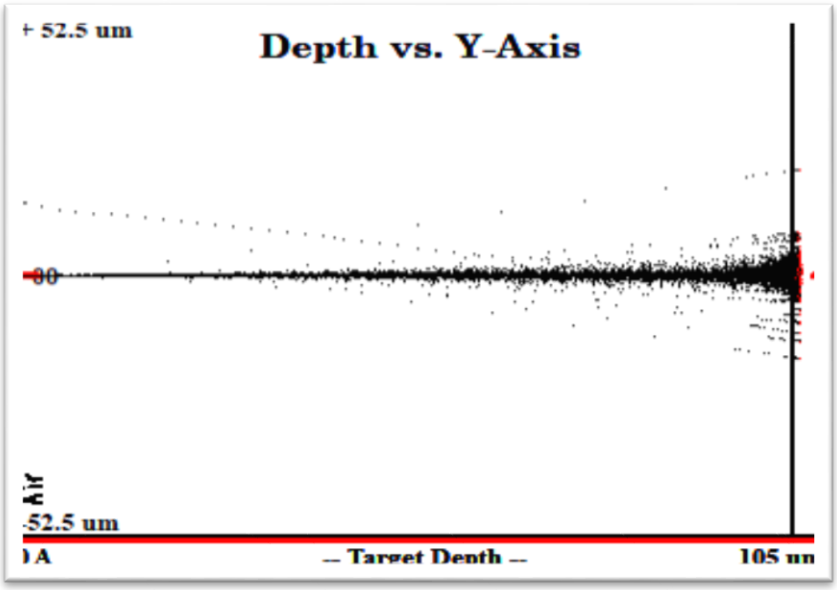
الشكل (5): مدى الأيونات عند مسافة 2 mm من الركيزة



الشكل (6): مدى الأيونات عند مسافة 1 mm من الركيزة

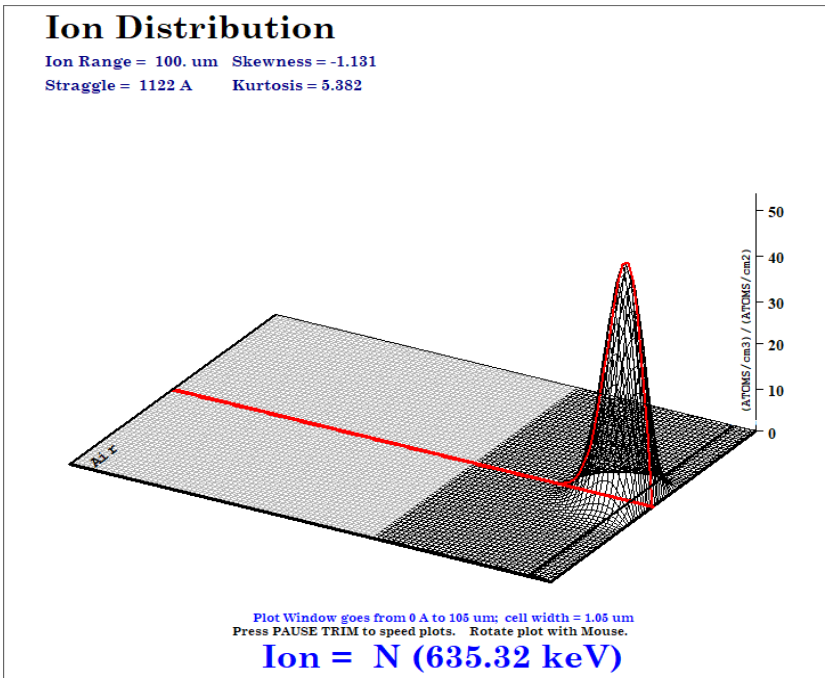


الشكل (7): مدى الأيونات عند مسافة 0.5 mm من الركيزة



الشكل (8): مدى الأيونات عند مسافة 0.1 mm من الركيزة

نلاحظ من الأشكال السابقة أن أيونات النتروجين لم تتمكن من الوصول إلى الركيزة وتخامدت بشكل كلي عند الأبعاد أكبر من 0.1 mm (الأشكال 4- 5- 6 -7)، بينما عند البعد 0.1 mm نلاحظ تمكن أيونات النتروجين من الوصول والتركز ضمن ركيزة التيتانيوم (الشكل 8) (أيونات النتروجين الواصلة إلى ركيزة التيتانيوم باللون الأحمر). تمّ التأكد من هذه النتيجة من خلال أخذ صورة ثلاثية الأبعاد الشكل (9) لتوضع أيونات النتروجين ضمن الركيزة:



الشكل (9): صورة ثلاثية الأبعاد لتوضع أيونات النتروجين ضمن الركيزة

الاستنتاجات:

أظهرت نتائج المحاكاة باستخدام كود Lee أن قيمة ضغط غاز النتروجين 0.1 Torr يحمل عندها أيون النتروجين أكبر طاقة 635.2337 kJ وذلك بعد انهيار قبضة البلازما (pinch) التي تعتبر منبع الأيونات، كما تم تحديد المسافة المطلوب وضع ركيزة التيتانيوم لضمان تركّز أيونات النتروجين

ضمنها يجب أن لا تتجاوز 0.1 mm لضمان اختراق أيونات النتروجين وأن أي مسافة أكبر سوف تفقد أيونات النتروجين طاقتها من خلال التصادم مع جزيئات الهواء وهذا متوافق مع الدراسة التجريبية [11] التي تمّت على جهاز بلازما محرقية متقارب بالطاقة مع طاقة تشغيل الجهاز المدروس (2.3 kJ) حيث أظهرت النتائج أن توضّع أيونات النتروجين على ركيزة التيتانيوم يتناقص مع ازدياد المسافة عن المنبع الأيوني (قبضة البلازما) مما يؤكد فقدان جزء كبير من طاقة أيونات النتروجين من خلال التصادم مع جزيئات الهواء. تفيد هذه الدراسة في توضيح الشروط اللازم توفرها لاستخدام أيونات النتروجين في ترسيب الفلم الرقيق TiN لناحية تحديد البعد الفعال لضمان وصول أيونات النتروجين إلى ركيزة التيتانيوم بالإضافة إلى أهمية إجراء الترسيب في شروط التخلية وذلك لضمان نجاحها بفعالية أكبر.

المراجع المستخدمة

[1] Silva, P., Soto, L., Kies, W., & Moreno, J. (2004). **Pinch evidence in a fast and small plasma focus of only tens of joules**. Plasma Sources Science and Technology, 13(2), 329.

[2] Haines, M. G. (2011). **A review of the dense Z-pinch**. Plasma Physics and Controlled Fusion, 53(9), 093001.

[3] Rawat, R. S., Chew, W. M., Lee, P., White, T., & Lee, S. (2003). **Deposition of titanium nitride thin films on stainless steel—AISI 304 substrates using a plasma focus device**. Surface and Coatings Technology, 173(2-3), 276-284.

[4] Inestrosa-Izurieta, M. J., Jauregui, P., & Soto, L. (2016, May). **Deposition of materials using a plasma focus of tens of joules**. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 720, No. 1, p. 012045). IOP Publishing.

[5] Inestrosa-Izurieta, M. J., Jauregui, P., & Soto, L. (2016, May). **Deposition of materials using a plasma focus of tens of joules**.

In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 720, No. 1, p. 012045). IOP Publishing.

[6] Shirani, B., & Abbasi, F. (2013). **Prospects for 13 N Production in a Small Plasma Focus Device**. Journal of Fusion Energy, 32, 235-241.

[7] Feugeas, J. N., Llonch, E. C., De González, C. O., & Galambos, G. (1988). **Nitrogen implantation of AISI 304 stainless steel with a coaxial plasma gun**. Journal of applied physics, 64(5), 2648-2651.

[8] Mather, J. W. (1965). **Formation of a high- density deuterium plasma focus**. The Physics of Fluids, 8(2), 366-377.

[9] Angeli, E., Tartari, A., Frignani, M., Mostacci, D., Rocchi, F., & Sumini, M. (2005). **Preliminary results on the production of short-lived radioisotopes with a Plasma Focus device**. Applied radiation and isotopes, 63(5-6), 545-551.

[10] Akel, M., Alsheikh Salo, S., Ismael, S., Saw, S. H., & Lee, S. (2014). **Interaction of the high energy deuterons with the graphite target in the plasma focus devices based on Lee model**. Physics of plasmas, 21(7).

[11] Hassan, M., Qayyum, A., Ahmad, R., Murtaza, G., & Zakaullah, M. (2007). **Nitriding of titanium by using an ion beam delivered by a plasma focus**. Journal of Physics D: Applied Physics, 40(3), 769.

[12] Dubinov, A. E., Fomicheva, E. I., & Senilov, L. A. (2020). **Research with plasma foci in countries of Asia, Africa, and Latin America**. Reviews of Modern Plasma Physics, 4(1), 6.

[13]The Universal Plasma Focus Machine, https://plasmafocus.net/IPFS/modelpackage/UPF.htm.

[14] SRIM, http://www.srim.org/SRIM/SRIM2011.htm.